

Lichttechnische und technologische Aspekte zur Dimensionierung adaptiver OLED Schlussleuchten im Automobil

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Philipp Rabenau, M.Sc.
geboren am 27.09.1989
in Gießen

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Uli Lemmer

Tag der Einreichung: 06.08.2019
Tag der mündlichen Prüfung: 31.10.2019

D17
Darmstadt 2019

Philipp Rabenau: *Lichttechnische und technologische Aspekte zur Dimensionierung adaptiver OLED Schlussleuchten im Automobil*

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2020

Tag der mündlichen Prüfung: 31.10.2019

Veröffentlicht unter CC BY-NC-ND 4.0 International



Erklärung

§ 8 Abs. 1 lit. c PromO

Ich versichere hiermit, dass die elektronische Version meiner Dissertation mit der schriftlichen Version übereinstimmt.

§ 8 Abs. 1 lit. d PromO

Ich versichere hiermit, dass zu einem vorherigen Zeitpunkt noch keine Promotion versucht wurde. In diesem Fall sind nähere Angaben über Zeitpunkt, Hochschule, Dissertationsthema und Ergebnis dieses Versuchs mitzuteilen.

§ 9 Abs. 1 PromO

Ich versichere hiermit, dass die vorliegende Dissertation selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen verfasst wurde.

§ 9 Abs. 2 PromO

Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, den 06.08.2019

gez. Philipp Rabenau

Meinen Eltern in Liebe und Dankbarkeit

Abstract

The organic light emitting diode (OLED) has recently evolved into an alternative for LED in vehicle rear lamps. This fact is highlighted by the OLED taillight applications of Audi TT RS and A8, BMW M4 GTS or Mercedes S Class Coupé. Aspects of light source technology and especially lighting technology with regard to an efficient usage are rarely discussed in research as well as questions about the perception of brightness.

Methods for an efficient development of OLED taillights are presented in this work. Especially photometric and colorimetric aspects are discussed. As shown in examples, an angle-dependent light distribution of an OLED can cause perceptible differences of luminance and color coordinates in rear lamps. In case of 2,5D Designs, various light areas can appear at different angles for one perspective. Hence, from this perspective, different luminances and color coordinates appear within the design. For the examined case, the perceptible differences are considered to be higher than the variations within the light areas.

Several OLED architectures can be used for taillight applications. Beside bottom and top emitters on glass substrate, bottom emitters on plastic substrate were investigated. With the focus on photometric and colorimetric characterization, a technological trade-off has to be considered: A directed light distribution, as typical for a top emitter, helps to efficiently meet the regulatory requirements, but causes large angular dependencies of luminance and color coordinates. The bottom emitter is the counterexample. Hence, depending on the application and visible angle, one has to choose the appropriate architecture.

Furthermore, three investigations were carried out to research the optimum brightness of homogeneous taillights. Within these studies, the influence of the observation distance, the size and geometry of the light area as well as the speed

of the signal in case of dynamic taillight functions was considered. To minimize interfering influences and to guarantee reproducible conditions, the investigations took place in a totally darkened light channel.

The results suggest the existence of a close range and a far range, which begins at approx. 30 *m*. Within the close range, the optimum brightness increases with the observation distance. In far range, a constant value between 864 *cd/m*² and 1430 *cd/m*² is recommended. The values of the dynamic signal are almost entirely below the static ones. One exception could be found at an angular velocity of 18°/*s*. This range should be avoided in future dynamic taillight applications.

Zusammenfassung

Die organische Leuchtdiode (OLED) hat sich seit kurzer Zeit zur LED Alternative in Fahrzeugheckleuchten entwickelt. Dies zeigt unter anderem der Einsatz der Lichtquelle als Schlusslicht im Audi TT RS und A8, BMW M4 GTS oder dem Mercedes S-Klasse Coupé und Cabriolet. Die technologischen und lichttechnischen Aspekte für die effiziente Nutzung des Leuchtmittels sowie Fragen der Helligkeitswahrnehmung bleiben hingegen in der Forschung bisweilen weitestgehend ungeklärt.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methodik zur effizienten Entwicklung von OLED Schlussleuchten vorgestellt. Hierbei wird insbesondere auf die photometrische und kolorimetrische Auslegung eingegangen. Beispiele zeigen, dass sich durch eine winkelabhängige Abstrahlcharakteristik der OLED sowohl wahrnehmbare Leuchtdichtedifferenzen als auch Farbortunterschiede in der Heckleuchte ergeben. Im Falle eines 2,5D Designs können mehrere Leuchtflächen für eine gewählte Perspektive unter unterschiedlichen Winkeln erscheinen. Für eine Perspektive treten somit unterschiedliche Leuchtdichten und Farborte innerhalb eines Designs auf. Im untersuchten Fall sind die hierbei wahrnehmbaren Inhomogenitäten höher einzuschätzen als jene innerhalb der Leuchtflächen.

Für den Einsatz in der Heckleuchte kommen diverse OLED Architekturen in Frage. Neben Bottom und Top Emittern auf Glas Substraten wurden im Rahmen dieser Arbeit ebenso Bottom Emitter mit Kunststoff Substrat hinsichtlich ihrer photometrischen und kolorimetrischen Eigenschaften untersucht. Zwischen gerichteter Abstrahlcharakteristik (Top Emitter) und somit effizienter Erfüllung der gesetzlichen Bestimmungen für den Straßenverkehr sowie geringer Winkelabhängigkeit von Leuchtdichte und Farbort (Bottom Emitter) besteht eine technologisch bedingte gegenläufige Abhängigkeit. Je nach Applikation in der Heckleuchte und

einsehbarem Winkelbereich empfiehlt sich demnach eine Entscheidung über die Wahl der Architektur.

Zur Erforschung der optimalen Helligkeit von homogenen Schlussleuchten wurden drei Untersuchungen durchgeführt. Hierbei wurde der Einfluss des Beobachtungsabstandes, der Leuchtflächengröße, der Leuchtflächengeometrie sowie der Signalgeschwindigkeit im Falle dynamischer Schlusslichtsignale untersucht. Zur Minimierung der Störeinflüsse und Gewährleistung reproduzierbarer Bedingungen fanden die Versuche in einem völlig abgedunkelten Lichtkanal statt.

Die Ergebnisse lassen bei der Wahrnehmung von Schlusslichtsignalen auf die Existenz eines Nahbereiches und eines Fernbereiches ab ca. 30m schließen. Im Nahbereich steigt die optimale Helligkeit der Schlussleuchte mit der Beobachtungsentfernung an. Für den Fernbereich wird eine konstante Schlusslichtleuchtdichte zwischen 864 cd/m^2 und 1430 cd/m^2 empfohlen. Die ermittelten Werte für das dynamische Signal liegen fast durchgängig unterhalb jener für das statische Schlusslicht. Eine Ausnahme bildet in den Untersuchungen der Wert bei einer Winkelgeschwindigkeit von $18^\circ/\text{s}$. Dieser Geschwindigkeitsbereich sollte daher bei der Auslegung zukünftiger dynamischer Schlussleuchten vermieden werden.

Vorwort

Mein besonderer Dank gilt all jenen, die vor zwei Jahren, als mein Leben eine krankheitsbedingte Wende nahm, mit all ihren Kräften und ihrer Fürsorge bis zur eigenen Erschöpfung an meiner Seite waren. Dieser Dank kommt von tiefstem Herzen und kann an dieser Stelle doch nicht dem gerecht werden, was ich zum Ausdruck bringen möchte. Ich hoffe, ich habe dafür noch ein langes Leben Zeit.

Mein großer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh. Die vielen fachlichen Diskussionen zur Promotion sowie darüber hinaus waren mir stets eine Anregung und Freude. Im Besonderen bin ich dankbar für die Begleitung nach der nicht freiwilligen Pause, als es darum ging, das Thema und die Dissertation zu Ende zu führen. Vielen Dank.

Prof. Dr. rer. nat. Uli Lemmer danke ich für die fachlichen Gespräche zum Thema OLED im Automobil, die wir meist während zufälliger Treffen auf Tagungen führten sowie der damit verbundenen Impulse für meine Arbeit.

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wurden während meiner Tätigkeit bei der AUDI AG in Ingolstadt in der Abteilung Lichtfunktionen/Innovationen durchgeführt. Mein Dank gilt hierbei Stephan Berlitz für seine stete Anerkennung und Förderung meiner Forschungsarbeiten.

Bei meinen ehemaligen Kollegen Dr. Thomas Werner und Reiner Lendle möchte ich mich für den fachlichen Austausch und die vielen hilfreichen Ratschläge bedanken. Ebenso denke ich weiterhin gerne an die vielen Gespräche abseits der

Promotionsthematik zurück.

Dr.-Ing. Michael Hamm danke ich für die vielen teils hitzigen Diskussionen zu meinem Promotionsthema. Diese haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Danke für die stets offene Tür und das zugehörige offene Ohr, auch wenn das Problem nichts mit meiner Promotion zu tun hatte. Danke auch für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Bei meiner ehemaligen Kollegin Dr. Isis Mennig möchte ich mich für den stets offenen Austausch während unserer gemeinsamen Zeit bei Audi bedanken. Während unserer Zusammenarbeit ist das Fundament für zwei Dissertationen entstanden, die die Grundlage für die Entwicklung zukünftiger Heckleuchten und Signalfunktionen liefern. Danke auch für die ein oder andere Diskussion abseits unserer Promotionsvorhaben.

Großer Dank gebührt Daniel Bachmaier, Jonathan Gail, Felix Kunick, Marcel Lang, Maurice Ollig und Franz Patzig. Eure Unterstützung in den diversen Abschnitten meiner Promotion hat das Gelingen ermöglicht. Ich wünsche Euch alles Gute.

Im Weiteren möchte ich mich bei meinen Kollegen des Fachgebietes Lichttechnik der TU Darmstadt bedanken. Die unkomplizierte Art Probleme zu lösen hat mich während meiner Aufenthalte vor Ort schnell voran gebracht. Den zu jederzeit ausführlich gepflegten fachlichen Austausch werde ich in guter Erinnerung behalten. Kyriakos Kosmas danke ich besonders für die hilfreichen Anmerkungen beim Korrekturlesen.

Dr. Carsten Funke danke ich nicht nur für den intensiven fachlichen Austausch im Rahmen meiner Promotion und das Korrekturlesen, vielmehr danke ich herzlich für unser freundschaftliches Verhältnis und dafür, dass Du und Mareike in Ingolstadt immer für mich da wart.

Manfred Geiser möchte ich für die hilfreichen Diskussionen zum Thema automo-

bile Beleuchtung und autonomes Fahren danken. Ich danke Dir für deine Freundschaft. Mir werden die vielen Unterredungen zu später Stunde in Lening unvergesslich bleiben.

Der größte Dank gilt meiner Familie: Meinen Eltern, meinem Bruder Johannes und meiner Verlobten Franziska. Ihr habt so einige Launen ertragen müssen, es aber stets verstanden mich wieder aufzuheitern. Danke für Eure grenzenlose Unterstützung. Ich liebe Euch.

Rabenau im Winter 2019

Philipp Rabenau

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIX
Tabellenverzeichnis	XXIII
Abkürzungsverzeichnis	XXV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Thema der Arbeit	2
1.3 Gliederung der Arbeit	3
2 Organische Leuchtdioden in der Heckbeleuchtung	5
2.1 Einführung	5
2.2 Funktionsweise der OLED	7
2.3 Anforderungen an die Technologie	10
2.3.1 Einflüsse auf die Lebensdauer	10
2.3.2 Lichttechnische Voraussetzungen	12
2.4 Technische Umsetzung	16
2.5 Modellansatz zur Entwicklung von OLED Heckleuchten	18
2.6 Praktische Anwendung des Modellansatzes	21
2.7 Untersuchung verschiedener OLED-Architekturen	28
2.7.1 Setup und Vorgehen	29
2.7.2 Photometrische Charakterisierung	30
2.7.3 Kolorimetrische Charakterisierung	33
2.7.4 Schlussfolgerung	34

3	Bisherige Forschung zu Helligkeit von Heckleuchten	37
3.1	Statische Signale	37
3.1.1	Cole und Brown [28] 1968	38
3.1.2	Mortimer [73] 1970	39
3.1.3	Schmidt-Clausen [89] 1983	41
3.1.4	Schmidt-Clausen [90] 1985	42
3.1.5	Armbruster [10], [11] 2001	43
3.1.6	Ripperger [83], [84] 2001	46
3.1.7	Mócko et al. [71] 2009	48
3.1.8	Kaltenbach [53], [54] 2009	49
3.1.9	Köth [58] 2009	51
3.1.10	Tatsumoto et al. [101] 2013	51
3.1.11	Tiecheng et al. [102] 2017	52
3.1.12	Zandi et al. [114] 2017	53
3.1.13	Polin und Khanh [80] 2017	54
3.1.14	Ries et al. [82] 2017	57
3.1.15	Scheer et al. [87] 2017	57
3.1.16	Mennig [69] 2018	58
3.2	Dynamische Signale	59
3.2.1	Kaltenbach [53] 2009	60
3.2.2	Hamm [45] 2013	60
3.2.3	Skinner und Bullough [96] 2014	61
3.2.4	Mennig et al. [68] 2016, Mennig [69] 2018	62
3.2.5	Weitere Forschungsarbeiten	64
3.3	Ableiten eigener Forschungsschwerpunkte	64
4	Untersuchungen zur optimalen Helligkeit	69
4.1	Experimenteller Aufbau	69
4.1.1	Charakterisierung des Heckleuchtenmusters	70
4.1.2	Lichttechnische Vermessung des Untersuchungsraumes	72
4.2	Versuchsmethodik und Ablauf	76
4.2.1	Untersuchung 1: Variation der Leuchtflächengröße A	76
4.2.2	Untersuchung 2: Variation der Leuchtflächengeometrie	77

4.2.3	Untersuchung 3: Dynamische Signale	77
4.3	Probanden	79
4.4	Mögliche Fehlerquellen im Versuchsdesign	79
4.4.1	Bewertungsskala	80
4.4.2	Technisch bedingte Abweichungen	80
4.4.3	Gegebenheiten während der Probandentests	82
4.4.4	Lichttechnische Messgeräte	82
4.4.5	Geometrische Messmittel	83
4.5	Statistische Testverfahren	83
4.5.1	Wahl des statistischen Testverfahrens	84
4.5.2	Voraussetzungen	86
4.5.3	Vorgehensweise	87
4.6	Auswertung der Untersuchungen	89
4.6.1	Untersuchung 1: Variation der Leuchtflächengröße A . . .	89
4.6.2	Untersuchung 2: Variation der Leuchtflächengeometrie . .	97
4.6.3	Untersuchung 3: Dynamische Signale	110
4.7	Fazit und Einordnung in die Literatur	119
4.7.1	Einfluss des Beobachtungsabstandes d	119
4.7.2	Einfluss der Leuchtflächengröße und Geometrie	120
4.7.3	Einfluss der Winkelgeschwindigkeit ω	120
4.7.4	Ermittelte optimale Leuchtdichten	121
5	Zusammenfassung der Forschungsergebnisse	125
5.1	Finale Diskussion der Forschungshypothesen	125
5.2	Weitere elementare Ergebnisse der Arbeit	127
5.3	Mögliches weiteres Vorgehen	127
Literatur		XXVII
Publikationen in Zeitschriften		XLI
Tagungsbeiträge		XLIII
Betreute Arbeiten		XLV

Abbildungsverzeichnis

2.1	Darstellung der OLED Heckleuchte des Audi TT RS.	7
2.2	Idealisierte Darstellung der OLED Bottom und Top Emitter Architekturen.	9
2.3	Darstellung der absoluten Häufigkeit verschiedener Leuchtflächen- größen für die Lichtfunktionen Schlusslicht, Bremslicht und Rich- tungsanzeiger.	14
2.4	Darstellung der maximalen und minimalen Leuchtdichten L_{min} und L_{max} für Schlusslicht, Bremslicht und Richtungsanzeiger.	15
2.5	Explosionsdarstellung der aktuellen Audi A8 Heckleuchte.	17
2.6	Methode zur OLED Heckleuchtenentwicklung.	20
2.7	Darstellung des beispielhaft behandelten OLED Bauteils sowie der Abhängigkeit der Leuchtdichte L und der Farbkoordinaten x,y vom Mess- bzw. Beobachtungswinkel eines OLED Testpixels.	23
2.8	Transmissionsgrad τ einer roten Abschlussscheibe.	25
2.9	Bewertung des Leuchtdichte- und Farbortunterschiedes der Leucht- flächen A_1 und A_2	27
2.10	Leuchtdichteverteilung der abgewickelten 2,5D OLED.	28
2.11	Zusammenfassung der photometrischen und kolorimetrischen Aus- wertung der untersuchten OLEDs 1 bis 6.	32
2.12	Kolorimetrische UNECE Anforderungen an die OLEDs.	34
4.1	Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus.	70
4.2	Schematische Darstellung des OLED Heckleuchtenmusters.	71
4.3	Abhängigkeit der OLED Leuchtdichte L von der Dimmstufe B	72

4.4	Vergleich der OLED Leuchtdichtevertellungen für die Dimmstufen 42%, 56% und 70%.	72
4.5	Grafische Erklärung zu Beobachtungswinkel β und Sehwinkel α . .	73
4.6	Leuchtdichtevertellung einschließlich Umfeldleuchtdichte L_U für die größte Flächengröße $A = 184,2 \text{ cm}^2$ bei einer Beobachtungsentfernung von $d = 5 \text{ m}$ und maximaler Dimmstufe (B=70%). . . .	74
4.7	Leuchtdichteschnitt nach Abb. 4.6.	75
4.8	Schematische Darstellung der in Untersuchung 1 (Variation der Leuchtflächengröße) gewählten Leuchtflächen.	77
4.9	Grafische Veranschaulichung der in Untersuchung 2 (Variation der Leuchtflächengeometrie) gewählten Leuchtflächengeometrien „Streifen“ und „Linie“.	78
4.10	Grafische Darstellung des innerhalb Untersuchung 3 (Dynamische Signale) verwendeten Signals.	78
4.11	Darstellung der $A = 46,1 \text{ cm}^2$ Daten (Verfahren 1) aus Untersuchung 1 als Boxplots.	96
4.12	Darstellung der $A = 103,6 \text{ cm}^2$ Daten (Verfahren 1) aus Untersuchung 1 als Boxplots.	96
4.13	Darstellung der $A = 184,2 \text{ cm}^2$ Daten (Verfahren 1) aus Untersuchung 1 als Boxplots.	97
4.14	Darstellung der Lichtstärke und Leuchtdichtehäufigkeitsverteilungen nach Verfahren 2.	98
4.15	Darstellung der Daten nach Verfahren 1 für Untersuchung 2 in Form von Boxplots.	102
4.16	Aufgetragen sind die Leuchtdichte L_μ und die Lichtstärke I_μ in Abhängigkeit des Beobachtungsabstandes d	104
4.17	Darstellung der Leuchtdichte L_μ in Abhängigkeit des Sehwinkels α . 105	
4.18	Aufgetragen sind die Beleuchtungsstärke E_μ am Auge und die Beleuchtungsstärke E_{Retina} auf der Retina in Abhängigkeit des Beobachtungsabstandes d	107
4.19	Minimalwertaufgabe: Grafische Darstellung der relativen mittleren Abweichung σ über der Leuchtdichteschwelle ΔL	110

4.20	Darstellung der Daten nach Verfahren 1 für Untersuchung 3 in Form von Boxplots.	115
4.21	Abhängigkeit der Leuchtdichte L_μ (nach Verfahren 2) von der Winkelgeschwindigkeit ω	117
4.22	Grafische Darstellung der korrigierten Beleuchtungsstärke auf der Retina $E_{kor.Retina}$ in Abhängigkeit der Signalgeschwindigkeit auf der Retina v_{Retina}	118
4.23	Darstellung der normierten Werte der korrigierten Beleuchtungsstärke auf der Retina $\epsilon_{kor.Retina}$ in Abhängigkeit der Signalgeschwindigkeit auf der Netzhaut v_{Retina}	119
4.24	Vergleich des im Rahmen dieser Arbeit ermittelten optimalen Leuchtdichteintervalls für homogene Schlussleuchten mit den Empfehlungen aus weiteren Forschungsarbeiten sowie dem „UNECE Leuchtdichtekorridor“ nach Abb. 2.4.	122

Tabellenverzeichnis

2.1	Kategorisierung von Showcar Heckleuchtentechnologien im Zeitraum von 1999 bis 2001.	6
2.2	UNECE Lichtstärkeintervalle für die Heckbeleuchtung.	13
2.3	Erforderliche Lichtstärkeverteilung für Schluss-, Bremsleuchten und Richtungsanzeiger.	13
2.4	Zusammenfassung der Farbwertanteile für die Flächen A_1 und A_2 des 2,5D OLED Designs.	24
2.5	Zusammenfassung der Farbwertanteile für die Flächen A_1 und A_2 des 2,5D OLED Designs analog zu Tab. 2.4, in diesem Fall jedoch unter Berücksichtigung einer roten Abschlusscheibe.	25
2.6	Auflistung der untersuchten OLEDs.	29
2.7	Strahlungseffizienzen der OLEDs 1-6.	31
3.1	Zusammenfassung der Parameter a , b und c aus Gl. (3.3).	50
3.2	Ausgewählte Studien zur optimalen Helligkeit von Schlussleuchten.	65
4.1	Zusammenfassung der Analyse der Umfeldleuchtdichte L_U auf Grundlage des Leuchtdichteschnitts nach Abb. 4.7	75
4.2	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Prüfung auf Sphärizität für Untersuchung 1.	90
4.3	Darstellung der Ergebnisse der Varianzanalyse für Untersuchung 1.	91
4.4	Darstellung der Ergebnisse der Paarvergleiche zwischen den einzelnen Flächengrößen A für die diversen in Untersuchung 1 eingestellten Beobachtungsabstände d	93

4.5	Untersuchung 1: Auflistung der Paarvergleiche zwischen den diversen Beobachtungsabständen d für die einzelnen bewerteten Flächengrößen A	94
4.6	Zusammenfassung der Resultate des Jarque-Bera und Shapiro-Wilk Tests für die verschiedenen Szenarien in Untersuchung 2. . .	99
4.7	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Paarvergleichen für Untersuchung 2.	101
4.8	Zusammenfassung der medianen Leuchtdichten L_{med} nach Verfahren 1 und mittleren Leuchtdichten L_{μ} nach Verfahren 2 für Untersuchung 1 und 2.	103
4.9	Übersicht der Ergebnisse des Jarque-Bera und Shapiro-Wilk Tests für Untersuchung 3.	111
4.10	Ergebnisse der Prüfung auf Sphärizität nach Mauchly (einfache Haupteffekte) für Untersuchung 3.	112
4.11	Zusammenstellung der Ergebnisse aus den Varianzanalysen für Untersuchung 3.	113
4.12	Zusammenfassung der Paarvergleiche für Untersuchung 3. . . .	114
4.13	Zusammenfassung der medianen Leuchtdichten L_{med} nach Verfahren 1 und mittleren Leuchtdichten L_{μ} nach Verfahren 2 für die diversen Durchlauf dauern t und die Beobachtungsabstände $d = 20m$ und $d = 5m$	116

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	.....	Analysis of Variance, dt. Varianzanalyse
DC	.....	Direct Current, dt. Gleichstrom
DMX	.....	Digital Multiplex
EBL	.....	Electron Blocking Layer, dt. Elektronenblocker
EML	.....	Emission Layer, dt. Emissionsschicht
ETL	.....	Electron Transport Layer, dt. Elektronentransportschicht
fMRT	.....	funktionelle Magnetresonanztomographie
HBL	.....	Hole Blocking Layer, dt. Lochblocker
HOMO	.....	Highest Occupied Molecular Orbital, dt. höchste besetzte Molekülorbital
HSD	.....	Honestly Significant Differences, dt. tatsächlich signifikante Differenzen
HTL	.....	Hole Transport Layer, dt. Lochtransportschicht
IMI	.....	ITO-Metall-ITO, siehe ITO
ITO	.....	Indium Tin Oxide, dt. Indiumzinnoxid
KBA	.....	Kraftfahrtbundesamt
LED	.....	Light Emitting Diode, dt. Leuchtdiode
LUMO	.....	Lowest Unoccupied Molecular Orbital, dt. niedrigste unbesetzte Molekülorbital
MTF	.....	Modulation Transfer Function, dt. Modulationsübertragungsfunktion
OEM	.....	Original Equipment Manufacturer, dt. Erstausrüster
OLED	.....	Organic Light Emitting Diode, dt. organische Leuchtdiode
PWM	.....	Pulsweitenmodulation
Q-Q Diagramm	.....	Quantil-Quantil-Diagramm
UNECE	.....	United Nations Economic Commission for Europe

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Signalfunktionen der Fahrzeugheckleuchte nehmen eine wichtige Aufgabe zur Verständigung im Straßenverkehr wahr. So schreibt Mennig [69] in ihrer Abhandlung über die Rolle von Heckleuchten bei Auffahrunfällen: „*Sie gewährleisten die Sichtbarkeit des Fahrzeuges sowohl bei Tag als auch bei Nacht und ermöglichen die Kommunikation mit dem Hinterherfahrenden durch eine visuelle Signalübertragung*“. Auch die Resultate von Mortimer [74] zeigen eine wichtige Rolle der Schlussleuchte bei der Wahrnehmung des Fahrzeugs, insbesondere bei Nacht auf. Armbruster [11] gibt das Risiko bei einem Unfall in der Nacht schwer verletzt oder getötet zu werden gar 2,5 mal höher an als tagsüber.

Studien zu Verkehrsunfällen von Baldock et al. [13] im Zeitraum von 1998 bis 2002 zeigten, dass 33% aller Vorkommnisse als Auffahrunfall einzustufen sind. Nach Mennig [69] entstehen die meisten Auffahrunfälle an einem Stauende (32,42%), durch das Auffahren auf ein stehendes Fahrzeug (24,88%) sowie während einer Nachfolgefahrt (27,26%). Abstandsvergehen analysiert sie hierbei in 38,32% aller Fälle als Hauptursache.

Zur Reduzierung von Auffahrunfällen kann die optimale lichttechnische Auslegung der Heckleuchte und insbesondere des Schlusslichtes als permanente Signalfunktion beitragen. Für die Wahrnehmung des Schlusslichtsignals spielt die Helligkeit eine besondere Rolle, denn nur bei optimaler Helligkeit kann eine unangenehme Blendung bzw. ein Übersehen der Funktion verhindert werden (vgl. [89], [11], [83]). Die Einflüsse auf die optimale Helligkeit sind hierbei vielfältig und umfassen neben der Umfeldleuchtdichte (vgl. [28], [53]), dem Abstand

zur Leuchte (vgl. [11], [80], [89], [90], [114]), der Leuchtflächengröße (vgl. [73], [89]) und der Leuchtengeometrie (vgl. [114]) unter anderem auch die Homogenität der Leuchte (vgl. [11], [101], [102]), die meist von der eingesetzten Technologie abhängt.

Für die Schlussleuchtenfunktion kündigt sich seit einigen Jahren der vereinzelte Einsatz organischer Leuchtdioden (engl.: Organic Light Emitting Diode, OLED) an. Im Audi TT RS und A8, BMW M4 GTS oder dem Mercedes S-Klasse Coupé und Cabriolet wird die Flächenlichtquelle bereits in der Serie eingesetzt. Die photometrischen und kolorimetrischen Bedingungen sowie die optimale Helligkeit der homogenen Lichtquelle für den Einsatz als Schlusslicht sind hierbei bis heute kaum erforscht.

Im Zeitalter des automatisierten Fahrens wird zunehmend die Fahrzeug-Personen Interaktion an Bedeutung gewinnen. Neben den klassischen Lichtfunktionen kann diese Kommunikation wesentlich durch dynamische Signale gestaltet werden (vgl. [123]). Die optimale Helligkeit von dynamischen Signalfunktionen ist bisweilen ein ebenfalls wenig untersuchtes Gebiet.

1.2 Thema der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich zunächst mit Methoden zur Gestaltung eines effizienten Prozesses zur Entwicklung einer OLED Heckleuchte. Hierbei werden insbesondere die photometrischen und kolorimetrischen Anforderungen berücksichtigt. Im weiteren Verlauf werden jene Eigenschaften verschiedener OLED Architekturen untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in der Fahrzeugheckleuchte bewertet.

Das Hauptaugenmerk der Arbeit liegt in der grundlegenden Erforschung der Helligkeitswahrnehmung von OLED Schlussleuchten bzw. homogenen Schlussleuchten im Allgemeinen. Hierzu wurden physiopsychologische Studien mit einem OLED Heckleuchtenmuster durchgeführt und der Einfluss des Beobachtungsabstandes, der Leuchtflächengröße, der Leuchtflächengeometrie sowie dynamischer Signale auf die Wahrnehmung der Helligkeit von Schlussleuchten berücksichtigt.

1.3 Gliederung der Arbeit

Kapitel 2 beschäftigt sich zunächst mit der grundlegenden Funktionsweise der OLED und den Anforderungen für den Einsatz der Technologie im Automobil. Im Kapitel wird zudem ein Modell zur Gestaltung eines effizienten Prozesses zur Entwicklung einer OLED Heckleuchte vorgestellt, was mit einem Beispiel aus der Praxis erläutert wird. Final werden die photometrischen und kolorimetrischen Eigenschaften verschiedener OLED Architekturen untersucht und im Hinblick auf die Anforderungen eines Fahrzeugschlusslichtes bewertet.

Eine Zusammenfassung bisheriger Forschungsarbeiten zur optimalen Helligkeit von Heckleuchten findet sich in Kapitel 3. Am Ende des Kapitels steht ein Fazit sowie die Formulierung der Forschungsfragen und Forschungshypothesen auf Grundlage der Literaturrecherche.

In Kapitel 4 sind alle Informationen zu den Probandentests zu finden. Neben dem experimentellen Setup einschließlich Charakterisierung des Heckleuchtenmusters und des Untersuchungsraums wird auf die Versuchsmethodik sowie mögliche Fehlerquellen im Testaufbau eingegangen. Einer Beschreibung des angewandten statistischen Testverfahrens folgt die Auswertung der Studiendaten und Interpretation sowie Einordnung in die Literatur.

Schließlich werden in Kapitel 5 die Forschungshypothesen anhand der Resultate dieser Arbeit geprüft und in Form von Lehrsätzen konkretisiert, bevor die Arbeit durch eine Empfehlung zur weiteren Erforschung der Helligkeitswahrnehmung von Heckleuchten abgeschlossen wird.

2 Organische Leuchtdioden in der Heckbeleuchtung

Für den Einsatz organischer Leuchtdioden (engl.: Organic Light Emitting Diode, OLED) im Automobil werden erhöhte Anforderungen an die Technologie gestellt. Nach einer kurzen thematischen Einführung und Erläuterung der Funktionsweise der OLED werden daher jene äußeren Einwirkungen und deren Einflüsse auf die Lebensdauer der Lichtquelle diskutiert. Ebenso wird auf die lichttechnischen Anforderungen eingegangen. Im Anschluss wird ein Modell zur effizienten Entwicklung von OLEDs für Heckleuchtenapplikationen vorgestellt und in einem Beispielfall angewendet. Der letzte Abschnitt widmet sich der photometrischen und kolorimetrischen Untersuchung diverser OLED Architekturen. Hierbei werden sowohl die gesetzlichen Anforderungen als auch Aspekte menschlicher Wahrnehmung berücksichtigt.

2.1 Einführung

Noch bis kurz vor dem 20. Jahrhundert waren die Fahrzeuge komplett ohne Beleuchtung unterwegs (vgl. [72]). Der Beginn des elektrischen Lichtes im Automobil fällt nach Moore und Rumar [72] in den Zeitraum von 1912-1919. Bis in die 1990 Jahre, für mehr als 70 Jahre, wird die Glühlampe konkurrenzlos eingesetzt, bevor erste Neonlichtquellen und LED Anwendungen Einzug in die Signalbeleuchtung halten (vgl. [72]). Die OLED wird zunächst nicht als Alternative diskutiert. Stattdessen bewertet Sivak [94] 1995 neben der LED und Neonlampe auch die „fast incandescent“ (zu dt. etwa: schnell glühend) Lampe aufgrund ihrer

kurzen Ansprechzeit als zukünftige Technologie für Signalleuchten.

Einen Hinweis auf kommende Technologie Generationen geben zumeist ausgestellte Prototypen der Fahrzeughersteller und Showcars auf internationalen Messen. Dubosc [32] kategorisierte während verschiedener Automobilausstellungen der Jahre 1999 bis 2001 126 verschiedene Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Scheinwerfer und Heckleuchtentechnologien, wobei er 77 jener Fahrzeuge als innovativ bzw. als Showcar einstufte. Seine Ergebnisse für die Heckbeleuchtung der Showcars ist in Tab. 2.1 zusammengefasst. Auch diese Auflistung aus dem Jahr 2001 ließe sowohl auf den zukünftigen Einsatz der LED Technologie als auch der Neonlampe schließen. Erste ernsthafte Diskussionen zum Einsatz der OLED im automobilen Umfeld kommen hingegen erst kurz darauf, Anfang des 21. Jahrhunderts, auf (siehe z.B. [44], [59]).

Die LED wird heutzutage aufgrund ihrer hohen Lebensdauer, hohen Aus-

Tabelle 2.1: Kategorisierung von Showcar Heckleuchtentechnologien im Zeitraum von 1999 bis 2001 frei nach Dubosc [32].

Kategorie	Anzahl Fahrzeuge	Anteil (%)
unconventionelles Design	9	12
LEDs	17	22
Neon Anwendungen	7	9
Abschlusscheibe ohne Optiken	52	68
Farblose Abschlusscheibe	21	27
lichtdurchlässige Materialien	4	5

fallsicherheit, geringen Baugröße und ihres niedrigen Energieverbrauchs bereits verstärkt in Heckleuchten eingesetzt [57], während die Neonlampen rare Anwendung finden und in der aktuellen Literatur wenig beachtet werden. Die OLED als Flächenlichtquelle wird hingegen auch aufgrund neuer Designmöglichkeiten als zukünftige Lichtquelle im Automobilbau gesehen (vgl. [56]). Im Moment werden erste glasbasierte OLEDs in Heckleuchten als Serienprodukt eingesetzt. Im Audi TT RS und A8, BMW M4 GTS oder dem Mercedes S-Klasse Coupé und Cabriolet erfüllt oder ergänzt sie die Aufgabe des Schlusslichtes. Wie das am Beispiel des Audi TT RS aussieht, ist in Abb. 2.1 dargestellt. In diesem Fall bilden vier OLED Lichtquellen und ein L-förmiges LED Lichtband die Schlusslichtfunktion. Der



Abbildung 2.1: Darstellung der OLED Heckleuchte des Audi TT RS. Gezeigt ist die Schlusslichtfunktion, die aus vier OLED Lichtquellen und einem L-förmigen LED Lichtband besteht. Entnommen aus einer Visualisierung der AUDI AG.

mittlere Bereich der OLEDs wird beim Betätigen des Bremslichtes hinzugeschaltet. Somit bietet die OLED Technologie zudem die Möglichkeit der unabhängigen Ansteuerung verschiedener scharf abgegrenzter Bereiche, die auch als Segmentierung bezeichnet wird. Die Größe der Segmente wird sich für nachfolgende Technologie Generationen weiter reduzieren, was verschiedenste Animationsszenarien erlaubt (vgl. [14]).

In Zukunft wird von einer Erweiterung der Lichtquelle von transparenten über flexible bis hin zu mehrfarbigen OLEDs ausgegangen [56]. Hierbei scheint insbesondere die flexible Technologie am intensivsten erforscht zu werden, wie einige Vorhaben zeigen (siehe [66], [115], [116], [120]).

2.2 Funktionsweise der OLED

Den Grundstein für die Entwicklung der heutigen OLED Technologie legten bereits Bernanose et al. [16] im Jahre 1953. Durch das Anlegen einer Wechselspannung an organische Zellen konnte der Effekt der Elektrolumineszenz nachgewiesen werden. Zehn Jahre später, im Jahr 1963, gelang es Pope et al. [81] auch im 400V Gleichstrombetrieb die Elektrolumineszenz organischer Kristalle zu erforschen. Als „erstes OLED Paper“ werden schließlich die Arbeiten von Tang und VanSlyke [100] bezeichnet. Im Gleichstrombetrieb zwischen 6 – 14V, bei etwa 5 mA/cm^2 , konnten Leuchtdichten von bis zu 50 cd/m^2 erreicht werden.

8 Kapitel 2. Organische Leuchtdioden in der Heckbeleuchtung

Bereits bei Tang und VanSlyke [100] bestand die OLED aus mehreren organischen Schichten innerhalb zweier Elektroden (vgl. auch Abb. 2.2). Im Wesentlichen kann hierbei das Funktionsprinzip der OLED wie folgt verstanden werden: Durch eine Elektron-Loch Wechselwirkung entsteht ein angeregter Molekülzustand, das sogenannte Exziton [104]. Als Folge der anschließenden Relaxation wird Licht emittiert [104]. Wehlus [110] und Frischeisen [37] detaillieren die physikalischen Prozesse während des Betriebs der OLED folgendermaßen aus:

1. *Ladungsträgerinjektion*
2. *Ladungstransport*
3. *Bildung eines Exzitons aus Loch und Elektron*
4. *strahlender Zerfall der Exzitonen.*

Die Ladungsträgerinjektion erfolgt über die beiden Elektroden. Über die Kathode werden die Elektronen in das niedrigste unbesetzte Molekülorbital (engl.: Lowest Unoccupied Molecular Orbital, LUMO) injiziert während über die Anode positiv geladene Löcher in das höchste besetzte Molekülorbital (engl.: Highest Occupied Molecular Orbital, HOMO) gelangen. Nach dem Ladungsträgertransport innerhalb des Bauteils kommt es zur Bildung des Exzitons, welches unter Aussendung von elektromagnetischer Strahlung zerfällt. (vgl. [110], [37])

Abb. 2.2 zeigt idealisierte OLED Architekturen nach Hofmann et al. [46] auf. Von der Anode aus folgt die Lochtransportschicht (Hole Transport Layer, HTL), der Elektronenblocker (Electron Blocking Layer, EBL), die Emissionsschicht (Emission Layer, EML), bestehend aus dem Emittermaterial, der Lochblocker (Hole Blocking Layer, HBL) sowie die Elektronentransportschicht (Electron Transport Layer, ETL) und schließlich die Kathode. Der komplette organische Aufbau zwischen den Elektroden wird als Stack¹ bezeichnet und ist einige nm dick (vgl. [37], [46], [110]).

Erfolgt der Lichtaustritt durch das Substrat (siehe Abb. 2.2a), so wird die Architektur als Bottom Emitter² bezeichnet. Neben einem transparenten Substrat

¹zu Deutsch: Stapel

²zu Deutsch etwa: „Unterseiten Emitter“)

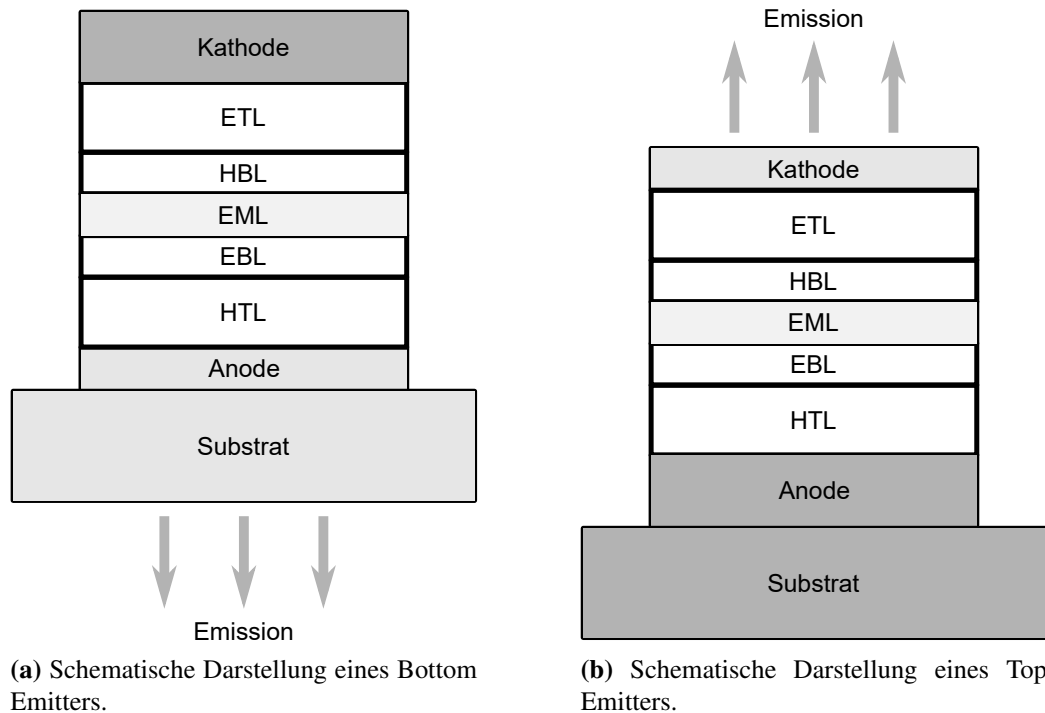


Abbildung 2.2: Idealisierte Darstellung der OLED Bottom und Top Emitter Architekturen nach Hofmann et al. [46]. Über der Anode wird die Lochtransportschicht (Hole Transport Layer, HTL) aufgebracht. Im weiteren folgt der organische Stack mit Elektronenblocker (Electron Blocking Layer, EBL), Emissionsschicht (Emission Layer, EML), Lochblocker (Hole Blocking Layer, HBL) und Elektronentransportschicht (Electron Transport Layer, ETL). Abschließend ist die Kathode angebracht. Während bei dem Bottom Emitter das Licht durch ein transparentes Substrat ausgekoppelt wird, so emittiert die Top Variante durch eine semitransparente Kathode.

erfordert die Lichtauskopplung hierbei ebenso eine transparente Anode, welche gewöhnlich aus Zinn dotiertem Indiumoxid (ITO) besteht. Die Kathode wird dann aus Aluminium oder Silber ausgeführt. Wird das Licht aus der Oberseite des Bauteils emittiert (siehe Abb. 2.2b), so spricht man von einem Top Emitter³. In diesem Fall werden in Verbindung mit hochreflektierenden Anoden semitransparente Kathoden verwendet. [46]

Besonders beim Einsatz zweier Metall Elektroden, wie im Falle des beschriebenen Top Emitters, treten verstärkt optische Resonanzen innerhalb der OLED Struktur auf, die physikalisch durch das Modell einer Fabry-Perot Kavität be-

³zu Deutsch etwa: „Oberseiten Emitter“

schrieben werden können und als Microcavity Effekt bezeichnet werden (vgl. [46], [62]). Als Auswirkungen des Microcavity Effektes nennen Hofmann et al. [46] unter Bezug auf die Arbeiten von Wu et al. [113] und Smith et al. [97] schmalere Spektren sowie das Wandern des Emissionspeaks und somit der Farbkoordinaten mit dem Beobachtungswinkel (vgl. die Untersuchungen in Kapitel 2.7). Ein gleiches Verhalten erkennt Frischeisen [37], der zudem die Nutzung des Microcavity Effektes zur Verbesserung der Lichtauskoppelung erwägt. Er sieht ebenfalls die Möglichkeit einer Optimierung der Abstrahlcharakteristik für bestimmte Winkelbereiche.

In der genannten Literatur ([37], [46], [110]) findet sich eine grundlegende Beschreibung des Microcavity Effektes und seiner physikalischen Mechanismen. Insbesondere Hofmann et al. [46] und Lin et al. [62] gehen hierbei auf die Beschreibung des Effektes auf Grundlage des Fabry-Perot Resonators ein. An dieser Stelle sei daher auf jene Ausführungen verwiesen.

2.3 Anforderungen an die Technologie

Für den Einsatz der OLED Technologie im Fahrzeug ist ein Verständnis der speziellen Anforderungen im automobilen Umfeld, sowie das Verhalten der Lichtquelle unter jenen Bedingungen notwendig. Im Folgenden sind daher sowohl die Einflüsse auf die Lebensdauer als auch die lichttechnischen Voraussetzungen für den effizienten Einsatz des Emitters in der Fahrzeugheckleuchte zusammengefasst.

2.3.1 Einflüsse auf die Lebensdauer

Die Lebensdauer der OLED Technologie wird im Bezug auf den Einsatz im Automobil in der Literatur vielfach diskutiert. Typischerweise werden über die Fahrzeuglebensdauer von 15 Jahren 300000 km bei 8000 h aktivem Betrieb angenommen (vgl. [103]). Kraus et al. [59] geben für ein Fahrzeugleben im Falle des Schlusslichtes eine geschätzte Nutzungszeit von 2000 h an. Die Betriebszeit des Bremslichtes und Richtungsanzeigers beziffern sie mit 720 h bzw. 160 h. Für die Lebensdauer der OLED im automobilen Umfeld nennen Thomas et al. [119] hierbei

- *hohe Temperaturen,*
- *hohe Luftfeuchtigkeiten und*
- *UV-Belastungen*

als wichtigste Einflussfaktoren.

Auch Jobst et al. [51] beschreiben die Temperatur als Herausforderung für den Einsatz der OLED Technologie im Automobil. Sie geben als Maximaltemperatur, bevor sich die OLED zersetzt, 120°C an. Bereits oberhalb von 100°C , so Kraus et al. [59], tritt eine schnelle Degradation des Leuchtmittels auf. Vieregge [106] und Dworzak [33] schätzen den nötigen Temperaturbereich für den Fahrzeugeinsatz zwischen -40°C bis 140°C ab. Diekmann [30] geht von Temperaturspitzen bis zu 85°C in einer Heckleuchte aus. Mit ca. 80°C analysieren Thomas et al. [119] ähnliche Temperaturen für eine OLED in einer Heckleuchte aus Versuchen im Heißband.

Trojak und Guebel [103] weisen darauf hin, dass die organischen Substanzen stark mit Wasserstoff und Sauerstoff reagieren, was eine hermetische Verkapselung des Bauteils erfordert. Unter Verweis auf Burrows et al. [24] nennen auch Pohlmann und Dworzak [79] das Eindringen von Sauerstoff und Feuchtigkeit aufgrund einer defekten Verkapselung als Ausfallgrund. Als Folge träten vermehrt nicht leuchtende Bereiche, die sogenannten *Black Spots*, auf.

Pohlmann und Dworzak [79] untersuchten ebenfalls den Einfluss von Sonnenstrahlung auf den OLED Emitter. Hierbei stellten sie ein Schrumpfen der Leuchtfächen fest, was sie auf die UV-Licht Anteile zurückführten. Diese bewirkten ein Ausgasen des als Isolationschicht verwendeten Passivierungslackes, was eine Diffusion in die OLED Schicht zur Folge habe. Vollmer und Schwegler [107] schlagen daher zum Schutz der OLED den Einsatz von PMMA Abschlusscheiben als UV Filter vor. Auf Grund weiterer Analysen halten Pohlmann und Dworzak [79] jedoch auch blaues Licht der Wellenlänge von ca. 450nm für eine Leuchtdichtedegradation des OLED Bauteils verantwortlich. Eine zusätzliche Entwicklung von photoresistenteren OLED Materialien erscheint ihnen daher als notwendig.

Kraus et al. [59] nennen neben externen Einflüssen auch interne Mechanismen, die durch den Betrieb der OLED entstehen und unter anderem zu einer Eigenenerwärmung führen. Die Degradation beschreiben sie anhand der Lebensdauer

T und der OLED Leuchtdichte L durch folgende Beziehung:

$$T \propto \frac{1}{L^\gamma}. \quad (2.1)$$

Hierbei läge γ je nach Art des organischen Materials typischerweise zwischen 1 und 2. Die Eigenerwärmung bei 1000 cd/m^2 beziffern Kraus et al. [59] mit ca. 15°C . Ähnliche Werte erhalten Thomas et al. [119].

Als besonderen Unterschied in der Auslegung der OLED Technologie im Vergleich zur LED Lichtquelle beschreiben Thomas et al. [119] die stete Veränderung der elektrooptischen Eigenschaften des organischen Leuchtmittels, auch wenn dieses nicht in Betrieb ist. Diesen Faktor der passiven Alterung erwähnen Trojak und Guebel [103] im Hinblick auf die Ersatzteilversorgung. Eine besondere Herausforderung sehen sie hierbei in der Entwicklung geeigneter Verkapselungen und Lagertests zur Lebensdauersimulation.

2.3.2 Lichttechnische Voraussetzungen⁴

Die lichtechnischen Anforderungen an Heckleuchten werden in Europa von der United Nations Economic Commission (UNECE) definiert. Folgende Aufgaben werden durch die entsprechenden Heckleuchtenfunktionen erfüllt:

- *Das Schlusslicht zeigt bei Ansicht des Hecks die Anwesenheit sowie die Breite des Fahrzeugs an [34].*
- *Das Bremslicht signalisiert dem Hinterherfahrenden das Betätigen der Bremsbremse [34].*
- *Durch die Betätigung des Richtungsanzeigers wird dem Hinterherfahrenden die Absicht mitgeteilt, die Fahrtrichtung zu ändern [35].*

Festgelegt sind im Regelwerk [34], [35] insbesondere die durch die Lichtfunktionen einzuhaltenden Lichtstärkebereiche sowie die Abstrahlcharakteristik bzw. Lichtstärkeverteilungskurven der Leuchten. Tab. 2.2 zeigt einen Ausschnitt aus den Anforderungen an Schlusslicht [34], Bremslicht [34] und Richtungsanzeiger

⁴Dieses Kapitel basiert in großen Teilen auf einer vorherigen Publikation des Autors [121].

[35] hinsichtlich minimaler und maximaler Lichtstärken I_{min} und I_{max} im statischen und variablen Betrieb. Während sich die Minimalwerte I_{min} zwischen statischem und variablem Betrieb nicht unterscheiden, so dürfen die Maximalwerte I_{max} im variablen Betrieb mehr als doppelt so hoch liegen. Eine Mindestanforderung zur Lichtstärkeverteilung [34], [35] spiegelt Tab. 2.3 wieder. Demnach ist vertikal ein Bereich von -10° bis 10° und horizontal ein Bereich von -20° bis 20° zu bewerten (vgl. Gl. (2.2)). Die Tabellenwerte sind als Prozentangaben des Minimalwertes I_{min} der jeweiligen Funktion nach Tab. 2.2 zu verstehen.

Zur Beurteilung der lichttechnischen Voraussetzungen von OLEDs als Flä-

Tabelle 2.2: UNECE Lichtstärkeintervalle für die Heckbeleuchtung. Dargestellt sind die unteren und oberen Grenzen der Lichtstärkeintervalle für statische und variable Einzel-leuchten anhand der Werte I_{min} und I_{max} für Schlusslicht [34], Bremslicht [34] und Richtungsanzeiger [35].

Funktion	statisch/variabel I_{min} (cd)	statisch I_{max} (cd)	variabel I_{max} (cd)
Schlusslicht	4	17	42
Bremslicht	60	260	730
Richtungsanzeiger	50	500	1000

Tabelle 2.3: Erforderliche Lichtstärkeverteilung für Schluss- [34], Bremsleuchten [34] und Richtungsanzeiger [35] in % des Minimalwertes I_{min} nach Tab. 2.2.

$\begin{matrix} \text{H } (^\circ) \\ \text{V } (^\circ) \end{matrix}$	-20	-10	-5	0	5	10	20
-10			20		20		
-5	10	20		70		20	10
0		35	90	100	90	35	
5	10	20		70		20	10
10			20		20		

chenlichtquelle ist die Leuchtdichte besonders geeignet. Zur Abschätzung der für den Einsatz im Automobil notwendigen Werte kann eine Beispielrechnung auf Grundlage der UNECE Anforderungen nach Tab. 2.2 erfolgen. Für $HV0$ ($H = 0^\circ$, $V = 0^\circ$, vgl. Tab. 2.3) können nach der Beziehung $L = \frac{I}{A}$ unter Kenntnis der

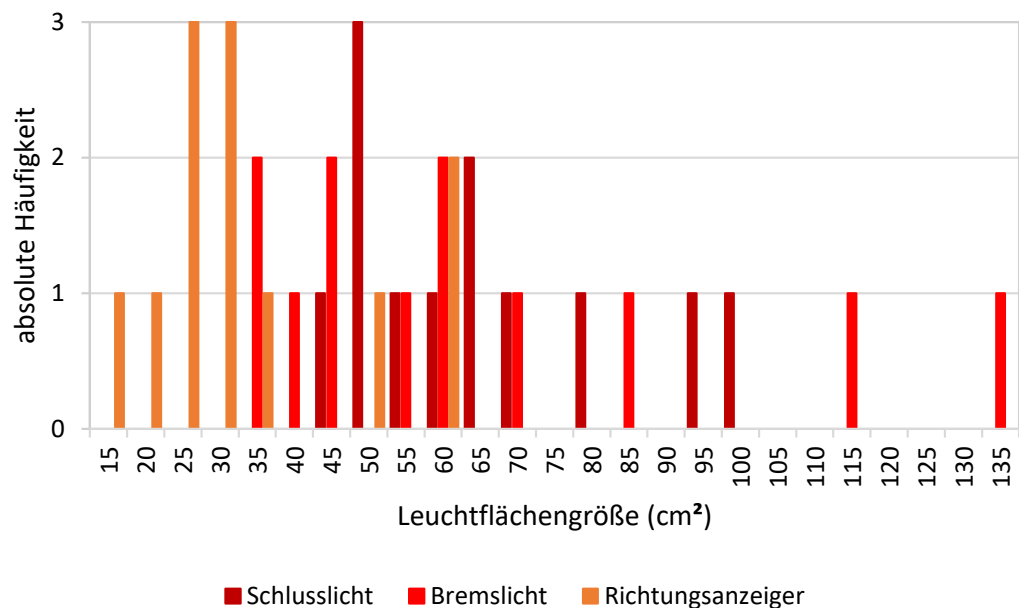


Abbildung 2.3: Darstellung der absoluten Häufigkeit verschiedener Leuchtfächengrößen für die Lichtfunktionen Schlusslicht, Bremslicht und Richtungsanzeiger. Insgesamt wurden 12 Audi Fahrzeuge verschiedener Modellreihen berücksichtigt.

Leuchtfächengröße A die entsprechenden Leuchtdichtewerte L aus den vorgeschriebenen Lichtstärkewerten I errechnet werden. Einen Eindruck über anzutreffende Leuchtfächengrößen im Automobilbereich liefert Abb. 2.3. Die Grafik fasst die absolute Häufigkeit verschiedener Flächengrößen für die Funktionen Schlusslicht, Bremslicht und Richtungsanzeiger zusammen. Insgesamt wurden 12 Audi Fahrzeuge unterschiedlicher Modellreihen berücksichtigt⁵. Für das Schlusslicht konnten Flächengrößen zwischen 45 cm^2 und 100 cm^2 ermittelt werden. Das Bremslicht liegt in einem Bereich von 35 cm^2 und 135 cm^2 und der Richtungsanzeiger zwischen 15 cm^2 und 60 cm^2 . Häufungen treten über alle Lichtfunktionen zwischen 25 cm^2 und 65 cm^2 auf.

Zur Beurteilung der notwendigen Leuchtdichten soll im Folgenden vereinfacht von einer Leuchtfächengröße von 50 cm^2 ausgegangen werden. Somit ergibt sich nach den Lichtstärkewerten aus Tab. 2.2 eine Mindestleuchtdichte von 800 cd/m^2 im Falle des Schlusslichtes. Für das Bremslicht und den Richtungsanzeiger er-

⁵Die Untersuchungen fanden im Rahmen der vom Autor betreuten Arbeiten von Lang [127] und Kunick [126] statt.

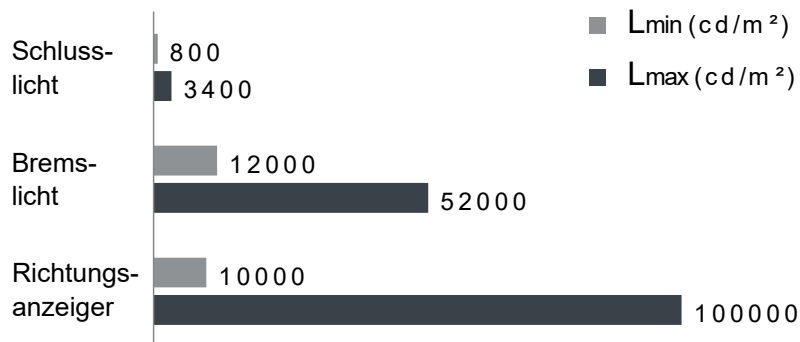


Abbildung 2.4: Darstellung der maximalen und minimalen Leuchtdichten L_{min} und L_{max} für Schlusslicht, Bremslicht und Richtungsanzeiger. Zugrunde gelegt sind die Lichtstärkeanforderungen bei statischem Betrieb nach Tab. 2.2 unter Annahme einer OLED Leuchtflächengröße von $A = 50 \text{ cm}^2$ [121].

geben sich Mindestanforderungen von 12000 cd/m^2 und 10000 cd/m^2 . Abb. 2.4 veranschaulicht die ermittelten Werte L_{min} ergänzt um die theoretischen maximalen Leuchtdichten L_{max} bei statischem Betrieb.

Mit dem Audi TT RS und A8, BMW M4 GTS oder Mercedes S-Klasse Coupé und Cabriolet fand die OLED Technologie Einzug in die Heckleuchte. Hierbei erfüllt bzw. ergänzt sie die Schlusslichtfunktion. Zur Realisierung von Bremslicht und Richtungsanzeiger werden nach Abb. 2.4 in Zukunft um den Faktor 10 höhere Leuchtdichten notwendig sein. Zur effizienten Umsetzung können zwei Möglichkeiten erwogen werden:

- *Verbesserung der Emitter Lichtausbeute*
- *Anpassung der Lichtstärkeverteilung an die gesetzlichen Anforderungen.*

Der erst genannte Aspekt bezieht sich hierbei auf die Effizienz der OLED einschließlich Aufbau/Architektur und Emitter wobei der zweite Punkt eine möglichst effiziente Erfüllung der Lichtstärkeverteilung nach gesetzlicher Vorgabe (vgl. Tab. 2.3) vorsieht. Auch Kraus et al. [59] raten in diesem Zusammenhang zu einer angepassten Lichtverteilung und führen zur Bewertung die Strahlungseffizienz η_s ein (siehe Kapitel 2.6, Gl. (2.3)). Sie schlagen folgende Maßnahmen

zur Optimierung der Lichtstärkeverteilung vor:

- *Extern: Einsatz einer Lichtauskoppelfolie auf der OLED*
- *Intern: Ausnutzung des Microcavity Effektes zwischen den OLED Elektroden (vgl. auch Kapitel 2.2).*

Der Einsatz einer Lichtauskoppelfolie ist hierbei mit einer Veränderung des äußeren Erscheinungsbildes der OLED verbunden, was bei der Anwendung des Microcavity Effektes unberührt bleibt. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund des Einsatzes der OLED als Designelement zu beachten. Eine weitere Abhandlung möglicher Lichtauskoppelmechanismen in OLEDs findet sich z.B. bei Saxena et al. [86].

2.4 Technische Umsetzung⁶

Grundlegende Unterschiede zu vergangenen Lichttechnologien ergeben sich bei der Integration einer OLED in eine Heckleuchte. Dies wird deutlich durch den Vergleich der optischen Strahlengänge einer OLED Lichtfunktion und einer LED Lichtfunktion. Werden LEDs zur Erzeugung der gewünschten Lichtverteilung zu meist mit zusätzlichen Optiken wie Reflektoren oder Linsen versehen, so wird die OLED aktuell im direkten Konzept (vgl. [60]) eingesetzt. Zur Erzeugung eines homogenen Erscheinungsbildes wird im Falle der LED zudem zusätzlich auf diffus streuende Optiken zurückgegriffen, während die OLED bereits ein homogenes Erscheinungsbild zeigt (vgl. [61]). Abb. 2.5 zeigt die beiden Technologien im Vergleich am Beispiel der aktuellen Audi A8 Heckleuchte. Wie in der Explosionsdarstellung deutlich wird, ist die LED Platine zur Realisierung einer homogenen Schlusslichtfunktion um eine diffuse Streuoptik ergänzt, während die OLED direkt hinter der Abschlussscheibe platziert ist. Auf Grund dieses unterschiedlichen Aufbaus sind mit der OLED Technologie mögliche Bauraumeinsparungen, Gewichtsvorteile (vgl. auch [33] und [79]) sowie Effizienzsteigerungen (vgl. [61]) verbunden.

Zur Beurteilung der Effizienz der OLED Technologie im Vergleich zur LED

⁶Dieses Kapitel basiert in großen Teilen auf einer vorherigen Publikation des Autors [121].

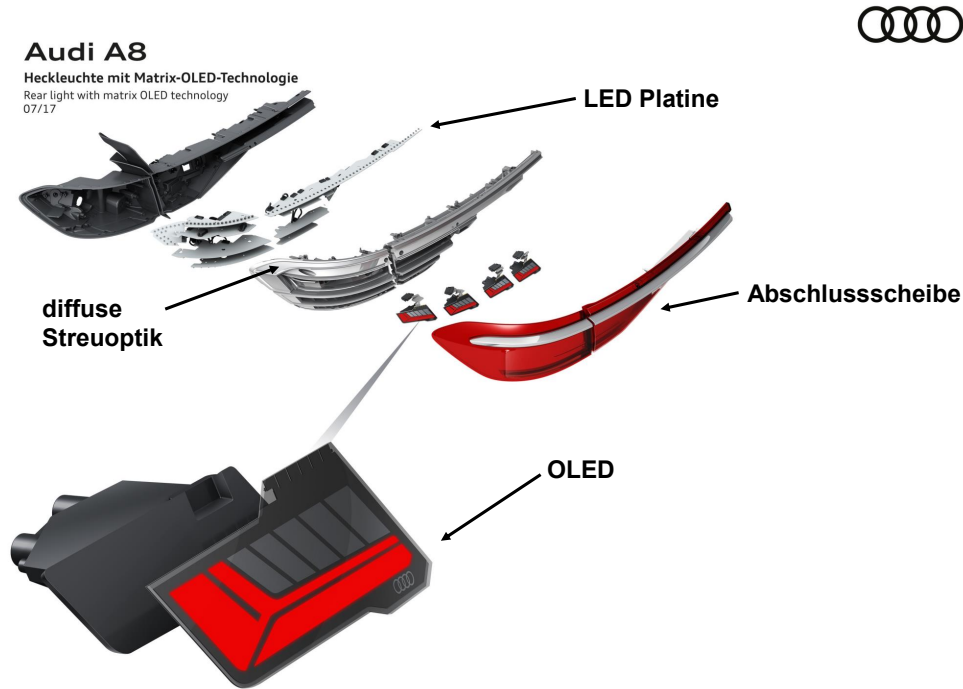


Abbildung 2.5: Explosionsdarstellung der aktuellen Audi A8 Heckleuchte. Die LED Platine ist zur Realisierung einer homogenen Schlusslichtfunktion mit einer diffusen Streuoptik erweitert. Die OLED ist direkt hinter der Abschlussscheibe angebracht. Ergänztes Visualisierung der AUDI AG.

Technologie wurden diverse homogene Schlusslichtfunktionen verschiedener Audi Modelle untersucht⁷. Hierzu wurden die Messdaten des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) für 12 verschiedene Leuchten analysiert. Die Lichtausbeute ρ_{UNECE} im gesetzlich vorgeschriebenen Winkelbereich (vgl. Tab. 2.3) wird wie folgt definiert:

$$\rho_{UNECE} = \frac{\int_{-10^{\circ}}^{10^{\circ}} \int_{-20^{\circ}}^{20^{\circ}} I_{Leuchte}(V, H) dH dV}{P_{Leuchte}}. \quad (2.2)$$

Hierbei ist $I_{Leuchte}(V, H)$ die winkelabhängige Leuchtenlichtstärke sowie $P_{Leuchte}$ die elektrische Leistung.

⁷Die Untersuchungen fanden im Rahmen der vom Autor betreuten Arbeiten von Lang [127] und Kunick [126] statt.

Als mittlere Lichtausbeute aller untersuchten LED Leuchten konnte ein Wert von $\bar{\rho}_{UNECE} = 0,31 \text{ lm/W}$ ermittelt werden. Im Vergleich dazu ergibt sich für eine aktuelle rote OLED für automotive Anwendungen mit lambertscher Abstrahlcharakteristik ein Wert von $0,28 \text{ lm/W}$, was 90% des LED Wertes entspricht. Im Falle homogener Lichtfunktionen stellt die OLED daher bereits heute eine vergleichsweise effiziente technische Lösung dar. Insbesondere vor dem Hintergrund zusätzlicher Bauraumvorteile und Gewichtseinsparungen ist der Einsatz aus technischer Sicht sinnvoll.

2.5 Modellansatz zur Entwicklung von OLED Heckleuchten⁸

Nach Gocke [40] wird in der Entwicklung von Fahrzeugleuchten das Endprodukt durch die technischen Faktoren

- *Funktion inklusive Gesetz* sowie
- *Design*

beeinflusst. Zusätzlich führt er die Kosten als Zielgröße im Entwicklungsprozess an. Die Entwicklung der Technologie und somit Lebensdauer der Lichtquelle wird hierbei nicht gesondert betrachtet. Im Falle von Glühlampen und LED Leuchten erscheint die Annahme praktikabel, da die Lebensdauer/Robustheit der Lichtquelle und die Leuchte bzw. ihr Design unabhängig voneinander entwickelt werden können. Ebenso kann über den Einsatz zusätzlicher optischer Bauelemente die Abstrahlcharakteristik beeinflusst und somit die gesetzlich notwendige Lichtstärkeverteilung generiert werden. Genannte Faktoren sind demnach entkoppelt. Es kann daher von einer weitestgehend unabhängigen Entwicklung von Lichtquelle und Leuchte gesprochen werden.

Im Falle einer OLED Heckleuchte fungiert die Lichtquelle im direkten Konzept nach Kropac und Kubena [60] nicht weiter als Setzteil. Die OLED ist ebenso Designelement wie optisches Bauteil und nimmt auf das Design wie auch die

⁸Dieses Kapitel basiert auf einer vorherigen Publikation des Autors [121].

Lichtstärkeverteilung gleichermaßen direkten Einfluss. Es kann daher nicht von einer unabhängigen Entwicklung von Leuchte und Lichtquelle ausgegangen werden. Die genannten Faktoren sind in diesem Fall gekoppelt und die Berücksichtigung der OLED Technologie und somit der OLED Lebensdauer/Robustheit gewinnt in diesem Zusammenhang deutlich an Einfluss innerhalb des Gesamtentwicklungsprozesses der Heckleuchte. Es ergeben sich daher im Falle einer OLED Heckleuchte folgende voneinander abhängige technische Zielgrößen:

- *Gesetzliche Anforderungen*
- *Design*
- *OLED Technologie inkl. Lebensdauer*

Die gekoppelten Größen verlangen einen iterativen Prozess zur Optimierung der Faktoren als Gesamtheit.

Ein möglicher Entwicklungsprozess ist in Abb. 2.6 dargestellt. Zu Beginn der Entwicklung können die OLED Technologie und im Speziellen die lichttechnischen Eigenschaften lediglich auf Grundlage unspezifischer Designs, sogenannter Testpixel, evaluiert werden. Zur Überprüfung eines ersten Designentwurfes hinsichtlich photometrischer und kolorimetrischer Zielgrößen dienen Spektraldaten der Testpixel für verschiedene Messwinkel. Das Design kann schließlich auf Basis der Pixeldaten auf einem 2D Medium⁹ visualisiert werden. Handelt es sich um flexible OLEDs, so können mit der Lichtquelle auch räumliche Darstellungsformen über die zweite Dimension hinaus umgesetzt werden. Da jedoch eine flexible OLED, ähnlich wie ein Blatt Papier, Einschränkungen hinsichtlich Biegung und Verdrehung (Torsion) unterliegt, spricht man nicht von 3D Formen sondern 2,5D Designs. In jenem Fall muss vor der Visualisierung zunächst eine Projektion von 2,5D auf 2D durchgeführt werden. Besonders im Falle des 2,5D Designs kann diese erste Untersuchung aufschlussreich sein, da je nach radiometrischer Abstrahlcharakteristik des Testpixels und somit der OLED Technologie, Inhomogenitäten in Farbe und Leuchtdichte der Projektion entstehen (siehe Kapitel 2.6).

Wird auf diese Weise ein erster gemeinsamer Designstand bei Erfüllung gesetzlicher Anforderungen und nötiger OLED Lebensdauer gefunden, kann im

⁹Siehe hierzu die vom Autor betreute Arbeit von Gail [125].

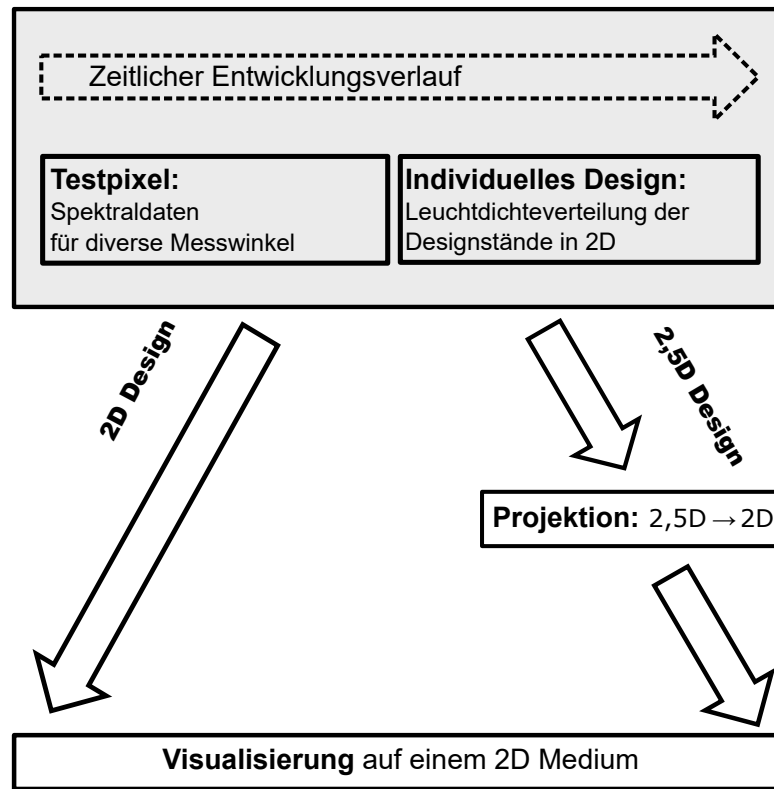


Abbildung 2.6: Methode zur OLED Heckleuchtenentwicklung. Zu Beginn der Entwicklung können über Spektraldaten verschiedener Messwinkel eines Testpixels bereits Informationen über die grundlegenden lichttechnischen Eigenschaften sowie insbesondere die Abstrahlcharakteristik der OLED Technologie gewonnen werden. Folgen im Prozess die ersten Designstände, kann zudem die Leuchtdichtevertellung bewertet werden. 2D Designs können direkt durch die Visualisierung auf einem 2D Medium simuliert werden. Im Falle von 2,5D Designs muss zunächst eine Projektion erstellt werden, die folgend visualisiert werden kann. Auf diese Weise kann zu jedem Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses, ohne Prototypenbau, eine Aussage zu Technologie und Designstand getroffen werden. Nach [121].

weiteren Entwicklungsverlauf die Leuchtdichtevertellung der Designs (2D) bzw. derer Abwicklung (2,5D) einbezogen werden. Dies ist von Bedeutung, da die Homogenität der Lichtquelle von der Größe und Form der Leuchtfläche sowie dem Kontaktlayout der OLED beeinflusst wird [119]. Ebenso können im Weiteren Einflussgrößen wie veränderliche Betriebsparameter (DC, PWM), Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit oder Alterungseffekte im Allgemei-

nen antizipiert und berücksichtigt werden. Durch diese iterative Vorgehensweise wird nach mehreren Anpassungsschleifen, ohne verfrühten und kostspieligen Prototypenbau, eine erste technische Lösung entwickelt.

Mit der Neugestaltung des Entwicklungsprozess geht zudem eine neue Aufgabenverteilung zwischen Tier 2 als Lichtquellenhersteller, Tier 1 als Leuchtenlieferanten und OEM als Fahrzeughersteller einher. Klassische Aufgaben des Tier 1, insbesondere die lichttechnische Auslegung der Leuchte einschließlich der dazu notwendigen Lichtsimulation, werden in einem schlanken Entwicklungsprozess idealerweise vom Design bestimmenden OEM durchgeführt. Dies erfordert ein neues, intensiveres Verhältnis zwischen Tier 2 und OEM. Der Tier 1 wird weiterhin eine wichtige Rolle in der mechanischen Integration der OLED in die Leuchte spielen. Eine entscheidende Aufgabe stellt sich in der Industrialisierung der Aufbringung der OLEDs auf einen Halter, der sogenannten Modularisierung. Dies erweist sich insbesondere im Falle von 2,5D OLEDs als enorme Herausforderung [115], [116] und kann neben den bereits zuvor definierten Zielgrößen im Entwicklungsprozess als weiterer elementarer Parameter verstanden werden.

2.6 Praktische Anwendung des Modellansatzes¹⁰

Wie in Kapitel 2.5 vorgeschlagen, können zu Beginn des Entwicklungsprozesses die Spektraldaten eines OLED Testpixels zur photometrischen und kolorimetrischen Bewertung der Design Idee herangezogen werden.

Im Falle eines 2D Designs bzw. einer starren OLED kann der Messwinkel φ mit dem Betrachtungswinkel auf das Bauteil gleichgesetzt werden. Über die Verläufe der Leuchtdichte und der Farbkoordinaten über φ kann somit ein erster, winkelabhängiger visueller Eindruck der OLED abgeleitet werden. Des Weiteren liefert die Lichtstärkeverteilungskurve bereits erste Aufschlüsse hinsichtlich der Erfüllung gesetzlich notwendiger Anforderungen an die Heckleuchte. Kraus et al. [59] schlagen zur Bewertung der OLED Lichtstärkeverteilung I_{OLED} einen mathematischen Vergleich mit der gesetzlich notwendigen Lichtstärkeverteilung I_{UNECE} vor. Favorisieren Kraus et al. [59] die Verwendung von 3D Verteilungen,

¹⁰Dieses Kapitel basiert auf vorherigen Publikationen des Autors [121], [115], [116].

so kann die Beurteilung unter der Annahme eines isotropen OLED Emitters auf den Vergleich zweier Schnitte der Lichtstärkeverteilungen reduziert werden:

$$\eta_S = \frac{\int_{\varphi_a}^{\varphi_b} I_{UNECE}(\varphi) d\varphi}{\int_{\varphi_a}^{\varphi_b} I_{OLED}(\varphi) d\varphi} \quad (2.3)$$

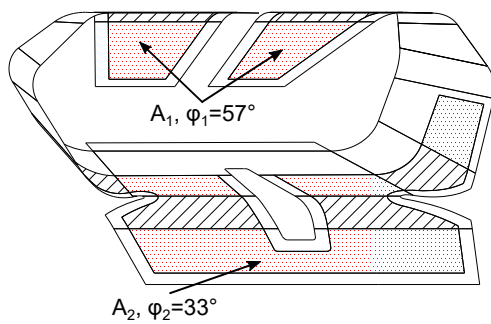
Die resultierende Größe η_S wird von Kraus et al. [59] als Strahlungseffizienz bezeichnet. φ_a und φ_b definieren den zu bewertenden Winkelbereich. Um den kritischsten Fall hinsichtlich gesetzlicher Bestimmungen abzudecken, wird nach Tab. 2.3 für I_{UNECE} $V=0^\circ$ gesetzt.

Im Falle dreidimensionaler OLED Designs bzw. einer flexiblen OLED ist ein zusätzlicher Aspekt zu diskutieren: Je nach Biegung der Lichtquelle ergeben sich unterschiedliche Betrachtungswinkel und somit Emissionswinkel der einzelnen Flächen der OLED. Gemessene Winkelabhängigkeiten der Leuchtdichte oder des Farbortes können somit zu Inhomogenitäten innerhalb des Bauteils führen. Beispielshaft wird dieser Sachverhalt anhand der Darstellung¹¹ in Abb. 2.7a diskutiert. Hierfür stehen Spektraldaten eines Testpixels mit Metall Substrat und Top Emitter Architektur in einer Auflösung von 0,6 nm zur Verfügung. Die Messungen wurden in 5° Schritten in einem Bereich von 0° (senkrecht zur OLED Oberfläche) bis 60° durchgeführt¹². Die Berechnung der photometrischen und kolorimetrischen Größen erfolgte auf der Grundlage der Datenbank des Colour & Vision Research Laboratory [4].

Unter der hier gewählten Perspektive stellt sich für das Flächenpaar A_1 ein Betrachtungswinkel von $\varphi_1 = 57^\circ$ ein, wohingegen die Fläche A_2 unter einem Winkel von $\varphi_2 = 33^\circ$ emittiert. Wird nach Abb. 2.7b bei einer senkrechten Messung (0°) von einer relativen Leuchtdichte von 1 ausgegangen, so ergibt sich für φ_1 eine relative Leuchtdichte von $L_{A_1} = 1,26$ und für φ_2 der Wert $L_{A_2} = 1,83$ anhand von linearer Interpolation zwischen den jeweils benachbarten Messpunkten. Paroni

¹¹OLED Design aus dem *Projekt Roll to Device 2* gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Förderkennzeichen: 13N12949

¹²Die Messdaten wurden von der OSRAM OLED GmbH, dem Hersteller der untersuchten OLEDs, aufgezeichnet.



(a) Skizze des 2,5D OLED Bauteils [121].

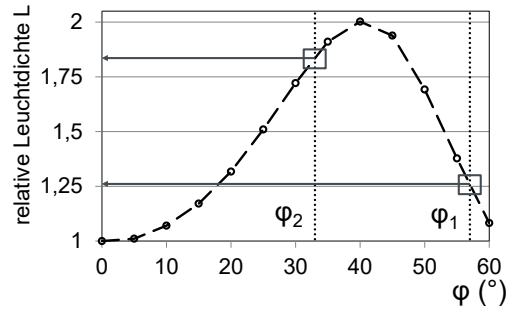
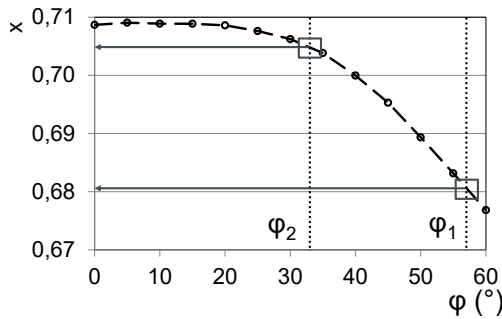
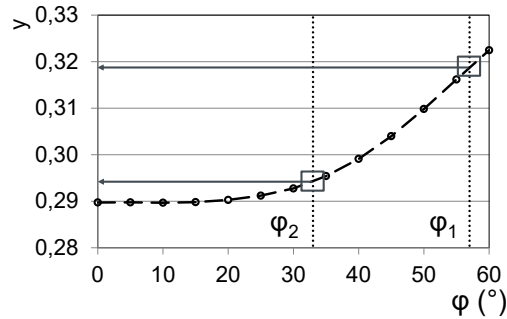
(b) Leuchtdichte L in Abhängigkeit des Mess-/Beobachtungswinkels φ .(c) Verlauf der Farbkoordinate x über dem Mess-/Beobachtungswinkel φ .(d) Verlauf der Farbkoordinate y über dem Mess-/Beobachtungswinkel φ .

Abbildung 2.7: Darstellung des beispielhaft behandelten OLED Bauteils in (a). Verdeutlicht sind die diskutierten Leuchtflächen A_1 und A_2 (rot), die in der hier gewählten Perspektive unter $\varphi_1 = 57$ und $\varphi_2 = 33$ emittieren. Die Darstellungen in (b), (c) und (d) zeigen die Abhängigkeit der Leuchtdichte L sowie der Farbkoordinaten x, y vom Mess- bzw. Beobachtungswinkel eines OLED Testpixels. Die gepunkteten senkrechten Linien verdeutlichen die Winkel φ_1 und φ_2 . Die Schnittpunkte der Linien mit den Datenkurven (graue Boxen) ermöglichen die Ermittlung des L , x und y Wertes der Flächen A_1 und A_2 und somit eine erste photometrische und kolorimetrische Bewertung des Bauteils. Die OLEDs wurden von der OSRAM OLED GmbH hergestellt und vermessen.

et al. [78] vergleichen in ihrer Arbeit die Homogenitätskriterien verschiedener Automobilhersteller. Ein Indiz für lokale Homogenität ist demnach der Michelson Kontrast K_m mit Werten kleiner 0,5 (vgl. auch [29]). Im konkreten Beispiel kann dieser folgendermaßen ausgedrückt werden

$$K_m = \frac{L_{A_2} - L_{A_1}}{L_{A_2} + L_{A_1}} \approx 0,18. \quad (2.4)$$

Er liegt somit unterhalb der definierten Schwelle. Globale Homogenität kann nach Paroni et al. [78] unter anderem durch das Verhältnis der mittleren Leuchtdichten verschiedener zu vergleichender Bereiche der Heckleuchte bewertet werden. Für den Vergleich zweier Bereiche definieren sie ein Leuchtdichteverhältnis zwischen 0,7 und 1,4 als homogen. Im konkreten Fall kann

$$\frac{L_{A_2}}{L_{A_1}} \approx 1,45 \quad (2.5)$$

berechnet werden, womit das globale Homogenitätskriterium nach Paroni et al. [78] nicht erfüllt ist.

Kommt zusätzlich eine Abschlusscheibe zum Einsatz, so muss deren Wirkung als optischer Filter berücksichtigt werden. Abb. 2.8 zeigt den Transmissionsgrad einer roten Abschlusscheibe. Die Multiplikation mit dem OLED Spektrum und anschließende Neuberechnung der photometrischen Größen liefert einen Kontrast von 0,23, was einem Anstieg von ca. 28% entspricht, jedoch weiterhin das lokale Homogenitätskriterium erfüllt. Zum Vergleich sind in Abb. 2.9a die Kontraste mit und ohne Abschlusscheibe grafisch dargestellt. Für das Leuchtdichteverhältnis ergibt sich beim Einsatz der Abschlusscheibe mit 1,59 erneut ein Wert außerhalb des von Paroni et al. [78] definierten Intervalls zur Prüfung der globalen Homogenität.

Die Farbkoordinaten der diskutierten Flächen A_1 und A_2 können Abb. 2.7c

Tabelle 2.4: Zusammenfassung der Farbwertanteile für die Flächen A_1 und A_2 des 2,5D OLED Designs. Zusätzlich sind die berechneten Farbortabstände Δ_{xy} und $\Delta_{u'v'}$ eingetragen.

$A_1, \varphi_1 = 57^\circ$		$A_2, \varphi_2 = 33^\circ$	
x_1	0,6806	x_2	0,7048
y_1	0,3187	y_2	0,2944
u'_1	0,4983	u'_2	0,5503
v'_1	0,525	v'_2	0,5172
Δ_{xy}		0,034	
$\Delta_{u'v'}$		0,053	

und Abb. 2.7d entnommen werden. Für $\varphi_1 = 57^\circ$ ergibt sich $x_1 = 0,6806; y_1 =$

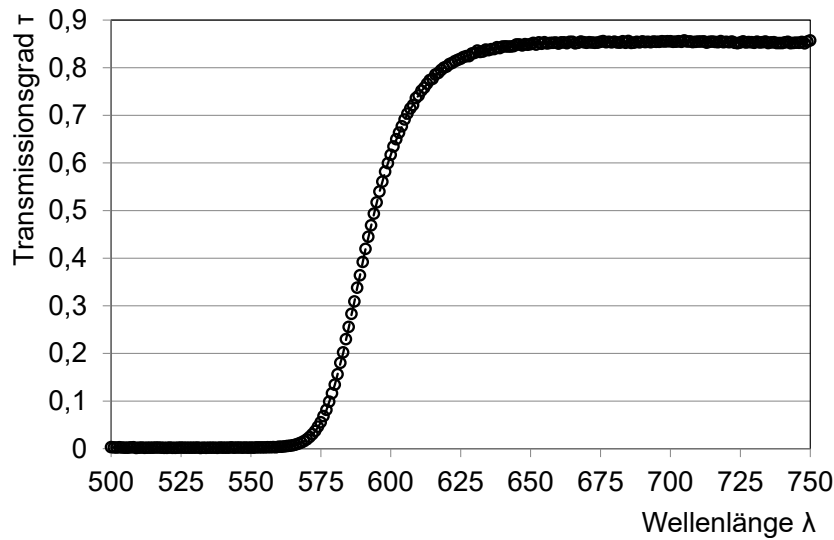


Abbildung 2.8: Transmissionsgrad τ einer roten Abschlusscheibe.

0,3187 und für $\varphi_2 = 33^\circ$ resultiert $x_2 = 0,7048$; $y_2 = 0,2944$, was im CIELUV Farbsystem den Farbwertanteilen $u'_1 = 0,4983$; $v'_1 = 0,5250$ und $u'_2 = 0,5503$; $v'_2 = 0,5172$ entspricht. Die Werte sind in Tab. 2.4 zusammengefasst und um die Farbortabstände der Koordinaten für A_1 und A_2 ergänzt. Zur Bewertung der Wahrnehmbarkeit des Farbunterschiedes können MacAdam Ellipsen dienen. Die ursprünglichen Untersuchungen von MacAdam [64] schließen zunächst keine roten Farben mit ein. Ein weiterer Vorschlag von MacAdam [65] ermöglicht jedoch die

Tabelle 2.5: Zusammenfassung der Farbwertanteile für die Flächen A_1 und A_2 des 2,5D OLED Designs analog zu Tab. 2.4, in diesem Fall jedoch unter Berücksichtigung einer roten Abschlusscheibe. Die berechneten Farbortabstände sind als Δ_{xy} und $\Delta_{u'v'}$ angegeben.

$A_1, \varphi_1 = 57^\circ$		$A_2, \varphi_2 = 33^\circ$	
x_{1AS}	0,6904	x_{2AS}	0,7086
y_{1AS}	0,3094	y_{2AS}	0,2914
u'_{1AS}	0,5179	u'_{2AS}	0,558
v'_{1AS}	0,5222	v'_{2AS}	0,5163
Δ_{xyAS}		0,026	
$\Delta_{u'v'AS}$		0,041	

theoretische Ermittlung von Ellipsen im roten Bereich. Das Verfahren arbeitet auf Grundlage der Ellipsengleichung

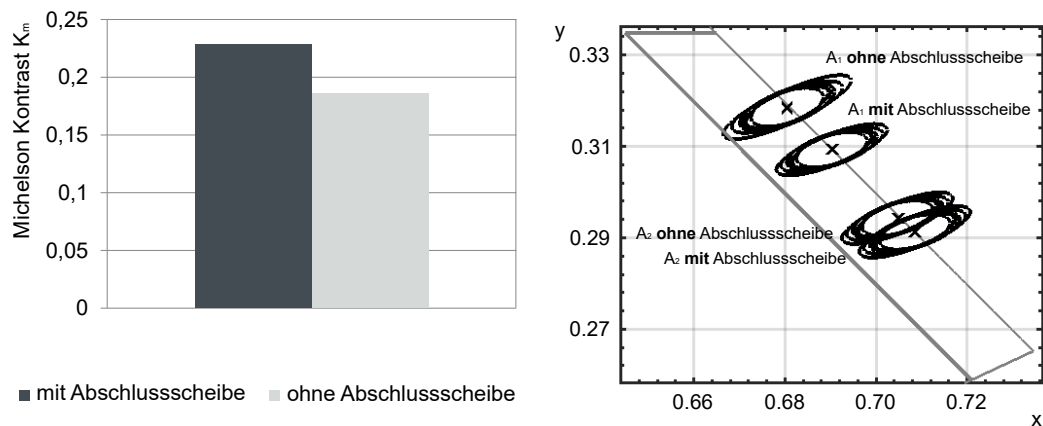
$$1 = g_{11}dx^2 + g_{12}dxdy + g_{22}dy^2, \quad (2.6)$$

wobei dx und dy als Distanz zwischen den x- und y-Koordinaten auf der Ellipse und deren Mittelpunkt verstanden werden können. Die Konstanten g_{11} , g_{12} und g_{22} werden abhängig von der diskutierten Farbkoordinate bestimmt. Da nach der Theorie von MacAdam [65] die Koordinaten $x_1; y_1$ sowie $x_2; y_2$ Resultate innerhalb eines Bereiches zweier möglicher Werte für die Größen g_{11} , g_{12} und g_{22} liefern, ergeben sich $2 \cdot 2 \cdot 2 = 2^3 = 8$ mögliche Variationen und somit Ellipsen. Die innere Region bzw. gemeinsame Schnittfläche aller acht Ellipsen, kann folglich als Bewertungsgrundlage dienen. Die berechneten 3-Stufen MacAdam Ellipsen¹³ sind in Abb. 2.9b dargestellt, welche ebenfalls um den Fall mit roter Abschluss Scheibe ergänzt ist. Die Farbwertanteile der bewerteten Flächen A_1 und A_2 mit Abschluss Scheibe sind zusammen mit den Farbortabständen in Tab. 2.5 zusammengefasst. Auf Grundlage der hier angewandten Theorie ist sowohl mit als auch ohne Abschluss Scheibe ein Farbunterschied zwischen den Flächen A_1 und A_2 wahrnehmbar¹⁴. Beim Vergleich der Farbortabstände durch Abb. 2.9b sowie Tab. 2.4 und Tab. 2.5 kann jedoch eine Verringerung durch den Einsatz der Abschluss Scheibe beobachtet werden. In beiden Fällen liegen die Farborte innerhalb des von der UNECE geforderten Korridors für rote Emitter [36] wie in Abb. 2.9b anhand des grau umrahmten Fensters verdeutlicht ist.

Auf Grundlage der Spektraldaten eines OLED Testpixels und einer Designidee des Bauteils können auf diese Weise erste photometrische und kolorimetrische Bewertungen durchgeführt werden. Das Vorgehen entspricht damit, wie in Kapitel 2.5 vorgeschlagen, dem vertikalen Verlauf des Schemas in Abb. 2.6. Innerhalb des horizontal dargestellten zeitlichen Entwicklungsverlaufs fließt zusätzlich die Bewertung des Leuchtdichtebildes in 2D, der sogenannten Abwicklung, mit

¹³Die Ellipsen wurden in MATLAB erzeugt. Die Implementierung wurde in einer vom Autor betreuten Abschlussarbeit von Gail [125] auf Grundlage der Theorie von MacAdam [65] durchgeführt.

¹⁴Nach der Theorie von MacAdam [64] gilt dies jedoch streng genommen nur für gleiche Helligkeiten.



(a) Michelson Kontrast K_m zwischen A_1 und A_2 [121].

(b) Vergleich der Farbkoordinaten von A_1 und A_2 mittels 3-Stufen MacAdam Ellipsen [121].

Abbildung 2.9: Bewertung des Leuchtdichte- und Farbortunterschiedes der Leuchtflächen A_1 und A_2 mithilfe des (a) Michelson Kontrastes K_m und (b) 3-Stufen MacAdam Ellipsen eingehüllt durch die UNECE Anforderungen für einen roten Emitter [36] (grau). Zwar kann der Farbortunterschied zwischen A_1 und A_2 durch die Verwendung der Abschlussseibe verringert werden, K_m hingegen steigt an [121].

ein. So können Leuchtdichtegradienten innerhalb der Leuchtflächen berücksichtigt werden. Die drei Segmente 1, 2 und 3 der Abwicklung des Bauteils weisen auf dem in Abb. 2.10 dargestellten Leuchtdichtebild maximale Kontraste von 0,08, 0,11 und 0,07 auf. Sie liegen damit deutlich unterhalb jener Werte, die zwischen den Flächen A_1 und A_2 berechnet wurden.

Auch ohne den Einsatz kostenintensiver Prototypen im frühen Entwicklungsstadium ist durch das beschriebene Vorgehen eine gute Einschätzung des optischen Erscheinungsbildes der Heckleuchte anhand von Spektraldaten eines Testpixels sowie der Designidee möglich. Die Berücksichtigung einer roten Abschlussseibe ist sinnvoll und ratsam. Im gewählten Fall verringert sich zwar der Farbunterschied zwischen den beispielhaft untersuchten Flächen A_1 und A_2 , der Kontrast K_m zwischen den Flächen steigt hingegen an. Die Einschätzung kann durch die Kenntnis der Leuchtdichteverteilung der Abwicklung präzisiert werden. Die Kontraste innerhalb der Leuchtflächen sind im untersuchten Fall jedoch deutlich geringer als jene zwischen den Flächen A_1 und A_2 , die auf der Winkelabhängigkeit der Leuchtdichte des OLED Testpixels fußen. Somit können diese für erste Beurteilungen der Technologie und des Designs vernachlässigt werden. Weitere

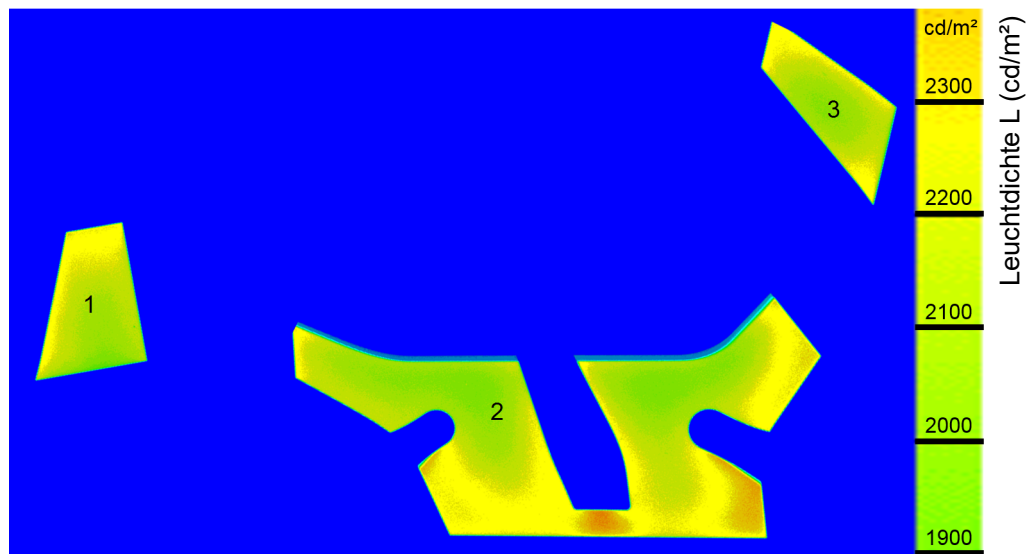


Abbildung 2.10: Leuchtdichteverteilung der abgewickelten 2,5D OLED. Die Aufnahme wurde von der OSRAM OLED GmbH aufgezeichnet [115], [116].

Änderungen an der physikalischen Eigenschaft des Emitters, hierzu zählt im Besonderen auch das Verhalten über die Lebensdauer oder am Design, können innerhalb des vorgeschlagenen Prozesses flexibel integriert und berücksichtigt werden.

2.7 Untersuchung verschiedener OLED-Architekturen¹⁵

Zur näheren Analyse des photometrischen und kolorimetrischen Verhaltens von OLED Lichtquellen im Hinblick auf den Einsatz in Fahrzeugheckleuchten wurden 6 verschiedene OLEDs untersucht¹⁶. Jene unterschieden sich in Architektur (Bottom, Top) und Art bzw. Beschaffenheit des Substrates (Glas, Kunststoff). Ebenfalls wurde der organische Aufbau der OLED variiert. Neben der Analyse 1-facher Stacks (1 Unit Stack) wurde in verschiedenen Variationen eine zusätzliche identi-

¹⁵Dieses Kapitel basiert auf einer vorherigen Publikation des Autors [120].

¹⁶Die OLEDs wurden vom Fraunhofer FEP, Dresden, im Rahmen einer Zusammenarbeit innerhalb des europäischen Förderprojektes *Pi-Scale* (Grant Agreement Nummer: 688093) hergestellt.

sche organische Struktur gestapelt (2 Unit Stack). Tab. 2.6 listet die untersuchten Lichtquellen auf und legt zur besseren Übersicht für folgende Betrachtungen und Diskussionen eine Nummerierung fest.

Tabelle 2.6: Auflistung der untersuchten OLEDs [120].

OLED Nr.	Architektur	Substrat	Units pro Stack
1	Bottom	Kunststoff	1
2	Bottom	Kunststoff	2
3	Bottom	Glas	1
4	Bottom	Glas	2
5	Top	Glas	1
6	Top	Glas	2

2.7.1 Setup und Vorgehen

Die OLEDs wurden zunächst spektral in 5° Schritten beginnend bei 0° (senkrecht zur OLED Oberfläche) bis 80° vermessen¹⁷. Hierzu wurde das Goniometer *DMS 401TM for OLED* der Firma Autronic-Melchers GmbH verwendet. Laut Datenblatt [1] liegt die Positionsgenauigkeit bei $0,1^\circ$ während eine Auflösung von $0,05^\circ$ angegeben ist. Die spektrale Auflösung des optischen Detektors *CCDSpect – 2TM* wird im Datenblatt [1] mit 870 Kanälen im sichtbaren Bereich zwischen 380 nm und 780 nm beschrieben, was ca. 0,46 nm pro Kanal entspricht.

Die OLED Testpixel 1, 2 (Bottom, Kunststoff) sowie 5 und 6 (Top, Glas) wiesen eine Leuchtflächengröße von $3,5\text{ cm}^2$ auf und wurden während der Messung bei einer konstanten Stromstärke von 10 mA betrieben. Für die OLEDs 3 und 4 (Bottom, Glas) mit einer Fläche von $0,22\text{ cm}^2$ wurde eine Stromstärke von 0,5 mA eingestellt. Die mittleren Stromdichten der OLEDs sind somit vergleichbar und liegen bei $2,68 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$ bzw. $2,27 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$. Um Veränderungen der Leuchtdichte der OLEDs durch thermische Effekte zu Beginn der Messungen auszuschließen, wurde nach dem Einschalten der Testpixel 1 Minute gewartet, sodass sich ein thermisches Gleichgewicht einstellen konnte.

¹⁷Die Messdaten wurden vom Fraunhofer FEP, dem Hersteller der untersuchten OLEDs, aufgezeichnet.

Als Ergebnis der Messungen wurden für die angefahrenen Winkel radiometrische Datensätze in Form von spektralen Strahldichten erzeugt. Mittels dieser Daten konnten auf der Grundlage der Datenbank des Colour & Vision Research Laboratory [5] die nachfolgend diskutierten photometrischen und kolorimetrischen Auswertungen durchgeführt werden.

2.7.2 Photometrische Charakterisierung

Verändert man den Beobachtungswinkel zur Fahrzeugheckleuchte, sollte möglichst kein wahrnehmbarer Helligkeitsunterschied feststellbar sein. Auf Grundlage der relativen Leuchtdichtewerte L für verschiedene Messwinkel φ (siehe Abb. 2.11a (ii)), kann eine mathematische Analyse durchgeführt werden. Die Messwerte sind auf den jeweiligen Maximalwert der Datensätze normiert.

Nach CIELAB und CIELUV Farbraum [31] kann aus der dritten Wurzel der Leuchtdichtewerte L ein Eindruck über den wahrgenommenen Helligkeitsverlauf gewonnen werden. Für alle gemessenen Winkel ist die Helligkeit $\sqrt[3]{L}$ in Abb. 2.11a (iii) aufgetragen. Mit 0,49 und 0,56 im Bereich von 0° bis 70° kann bei den Top Emitter OLEDs 5 und 6 der größte Helligkeitsunterschied gemessen werden. Die Auswirkung des Microcavity Effektes wird hier deutlich. Bei Bedarf kann der optische Resonator so eingestellt werden, dass sich über das OLED Spektrum eine gezielte Verstärkung um 0° ergibt¹⁸. Mit 0,06 und 0,08 liegen die Unterschiede bei den Bottom Emittern auf Glassubstrat (OLED 3, 4) bei 12% bzw. 14%. Auch beim Bottom Emitter mit Kunststoff Substrat spielt der Microcavity Effekt eine besondere Rolle. Dieser wird durch die ITO-Metall-ITO (IMI) Anode¹⁹ der OLEDs verstärkt. Somit liegen die Werte für den Bottom Emitter mit Kunststoff Substrat oberhalb des Bottom Emitters auf Glas, jedoch unterhalb jener des Top Emitters mit Glas Substrat.

Je nach Einbaulage bzw. Einbautiefe der OLED in der Heckleuchte nimmt der einsehbare Winkelbereich ab und somit auch der eben errechnete Vorteil des Bottom Emitters gegenüber dem Top Emitter in einem Bereich von 0° bis 70° . In

¹⁸Ein gegenteiliges Beispiel ist in Abb. 2.7b dargestellt. Der optische Resonator ist hier so eingestellt, dass sich ein Leuchtdichtemaximum bei ca. 40° ergibt

¹⁹Eine IMI Anode eignet sich im Falle der Kunststoff Substrate besonders auf Grund geringerer Prozesstemperaturen während der Aufbringung.

einem Bereich von 0° bis 25° nähern sich die Helligkeitsunterschiede von OLED 3 und 4 mit 0,004 und 0,031 an jene der OLEDs 5 und 6 mit 0,038 und 0,039 an. Für diesen Anwendungsfall ist der Top Emitter aus Gründen der Effizienz dann sogar im Vorteil, was auch durch die folgende Betrachtung gestützt wird.

Ein charakteristisches Maß zur Beurteilung der Eignung der Lichtstärkeverteilungskurve hinsichtlich der Mindestanforderungen im Rahmen der UNECE-Regularien [35] kann mithilfe der Strahlungseffizienz nach Gl. (2.3) gewonnen werden. Abb. 2.11a (i) zeigt die Lichtstärkeverteilungen I_{OLED} der OLEDs 1-6 als Polarplot. Die zur Berechnung von η_S angenommene Verteilung I_{UNECE} basiert auf den Daten aus Tab. 2.3 für $V = 0^\circ$ und ist ebenfalls eingezeichnet (schwarz). Auf Basis der gegebenen Messdaten wurden als Integrationsgrenzen $\varphi_a = -70^\circ$ und $\varphi_b = 70^\circ$ festgelegt. Tab. 2.7 fasst die Ergebnisse für die Strahlungseffizienzen η_S zusammen.

Durch den verstärkten Microcavity Effektes resultieren für die Glas basierten

Tabelle 2.7: Strahlungseffizienzen der OLEDs 1-6 [120].

OLED Nr.	1	2	3	4	5	6
η_S	0,20	0,22	0,19	0,18	0,27	0,25

Top Emitter (OLED 5, 6) die höchsten η_S -Werte. Der 1-Unit Stack erreicht einen Wert von 0,27 während sich für den zweifach Stack (2-Units) ein Wert von 0,25 ergibt. Mit Werten von 0,19 und 0,18 liegen die Ergebnisse für die Bottom Emitter (OLED 3, 4) auf dem gleichen Glas Substrat deutlich niedriger (ca. -30%). Auch die OLEDs auf Kunststoff Substrat (OLED 1, 2) zeigen im Vergleich zum Bottom Emitter auf Glas Substrat mit 0,20 und 0,22 eine erhöhte Strahlungseffizienz η_S , was ebenfalls auf den Microcavity Effekt zurückzuführen ist.

Für die betrachteten Beispiele ist eine gerichtete und somit effizientere Lichtemission stets von erhöhten winkelabhängigen Helligkeitsunterschieden begleitet. Je nach Anwendungsfall kann jedoch die Konstanz der wahrgenommenen Helligkeit in kleineren Winkelbereichen ausreichen. Für Beobachtungswinkel φ von 0° bis 25° ergeben sich zwischen den diversen Architekturen nur geringe Unterschiede. Die OLEDs 5 und 6 wären demnach aus Gründen der Effizienz im Vorteil. Das photometrische Verhalten der 1-Unit Stacks und 2-Unit Stacks ist vergleichbar.

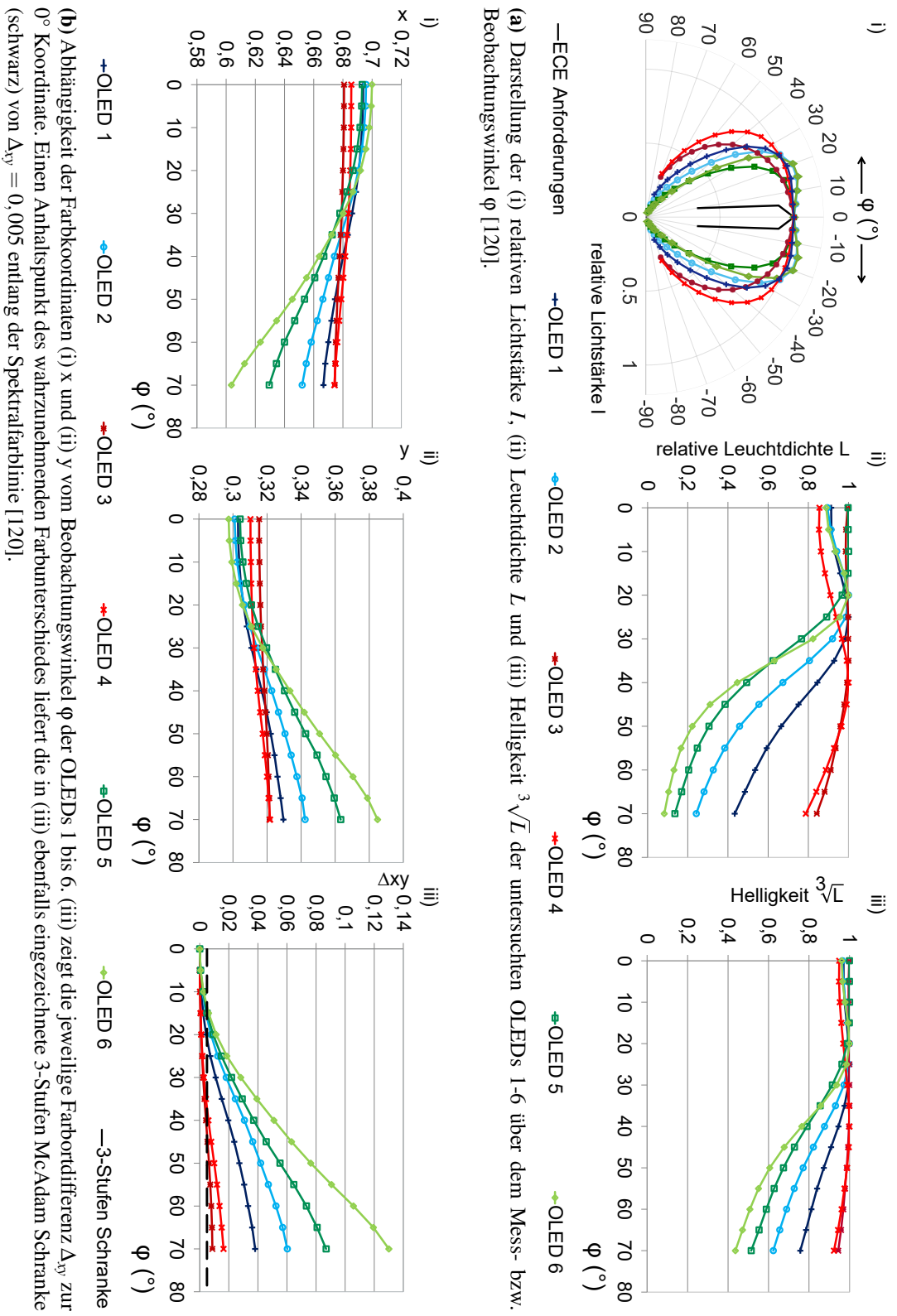


Abbildung 2.11: Zusammenfassung der (a) photometrischen und (b) kolorimetrischen Auswertung der untersuchten OLEDs 1 bis 6 [120].

2.7.3 Kolorimetrische Charakterisierung

Die kolorimetrische Charakterisierung der OLEDs 1-6 erfolgt anhand der Normfarbwertanteile x und y . Diese sind in Abb. 2.11b (i) und (ii) über dem Beobachtungswinkel φ aufgetragen und dienen für die folgende Analyse als Grundlage. Zur Beurteilung des Farbverlaufes über dem Beobachtungswinkel kann die Farbortdifferenz als Abstand zur 0° Koordinate definiert werden. Die ermittelten Differenzen sind in Abb. 2.11b (iii) dargestellt. Aufgrund des Microcavity Effektes treten erwartungsgemäß die größten Farbortdifferenzen $\Delta_{xy} = 0,087$ und $0,13$ bei den OLEDs 5 und 6 auf. Hingegen betragen die Abstände bei den Bottom Emittern 3 und 4 $0,009$ und $0,016$ in einem Winkelbereich von 0° bis 70° . Zwischen 0° und 25° sinken die Differenzen analog zu den zuvor diskutierten Leuchtdichteunterschieden auf $0,015$ und $0,019$ für OLED 5 und 6 sowie $0,002$ für OLED 3 und 4. Die Werte für OLED 1 und 2 liegen wiederum innerhalb jener der Bottom und Top Emitter mit Glas Substrat.

Zusätzlich zeigt Abb. 2.11b (iii) eine 3-Stufen MacAdam Schranke (schwarz). Jene wurde auf Grundlage der Ergebnisse in Kapitel 2.6 nach Abb. 2.9b definiert. Sie liegt bei $\Delta_{xy} = 0,005$ und ergibt sich aus dem innersten Durchmesser der Ellipsen entlang des Spektralfarbenzuges. Aufgrund der hohen spektralen Farbanteile p_e der OLED Emitter liefert die Annahme so einen Hinweis auf den wahrzunehmenden Farbunterschied²⁰. In einem Winkelbereich von 0° bis 25° erfüllt dieses gesetzte Kriterium alleinig der Bottom Emitter mit Glas Substrat (OLED 3 und 4). Leicht oberhalb der Schranke liegt der Bottom Emitter mit Kunststoff Substrat und 1-Unit Stack (OLED 1). Alle weiteren Architekturen überschreiten das Limit deutlich ($>100\%$).

Die Farbkoordinaten aller untersuchten OLED Architekturen bewegen sich mit steigendem Winkel φ entlang der Spektralfarblinie in Richtung hellroter Farben. Abb. 2.12 (i) verdeutlicht dieses Verhalten am Beispiel des Bottom (rot) und Top Emitters (grün) mit Glas Substrat (OLED 3 und 5). Im Besonderen fällt die tiefrote Farbe des Top Emitters bei 0° auf, die sich in Richtung 70° stark ins Hellrote bzw. Orange verschiebt. Das gleiche Verhalten zeigt OLED 6 als 2-Unit

²⁰Die definierte Schranke entspricht ca 1 nm bis 3 nm der dominanten Wellenlängen λ_d in einem Bereich von 600 nm bis 630 nm

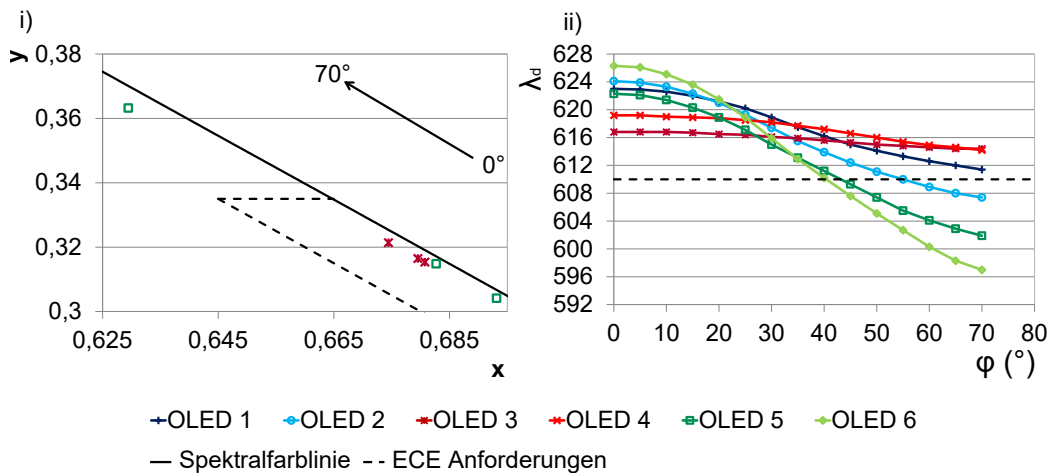


Abbildung 2.12: Kolorimetrische UNECE Anforderungen an die OLEDs. (i) Nähere kolorimetrische Analyse am Beispiel des Bottom Emitters und Top Emitters mit Glas Substrat. Der Top Emitter liegt ab ca. 40° Beobachtungswinkel außerhalb des gestrichelten UNECE Korridors. (ii) Darstellung der dominanten Wellenlänge λ_d der OLEDs über dem Beobachtungswinkel. Für $p_e = 1$ liegt das untere UNECE Limit (gestrichelte Linie) bei $\lambda_d = 610\text{ nm}$ [120].

Stack. Die Farbstabilität des Bottom Emitters wird hingegen bestätigt, wenngleich die 0° Emission hellroter als jene des Top Emitters ist.

Die Winkelabhängigkeit im Falle des Top Emitters macht jedoch zusätzlich eine genaue Untersuchung auf die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen für rote Emitter [36] notwendig. Jener Bereich ist in Abb. 2.12 (i) als gestricheltes Fenster eingezeichnet. Für Emitter mit einem spektralen Farbanteil von $p_e = 1$ ergibt sich ein theoretisches Limit in Richtung hellrot/orange bei einer dominanten Wellenlänge $\lambda_d = 610\text{ nm}$. Wie Abb. 2.12 (ii) veranschaulicht, erfüllen dieses Kriterium lediglich OLED 3, 4 (Bottom, Glas) und 1 (Bottom, Kunststoff, 1-Unit) in einem Winkelbereich von 0° bis 70°. Bis 55° erfüllt auch der 2-Unit Stack mit Kunststoff Substrat (OLED 2) die Anforderungen. Der Top Emitter auf Glas Substrat (OLED 5, 6) liegt ab ca. 40° außerhalb des Korridors.

2.7.4 Schlussfolgerung

Abgesehen von den Bottom Emitttern mit Glassubstrat (OLED 3, 4) zeigen die weiteren untersuchten OLED Architekturen eine tendenziell gerichtete Abstrahl-

charakteristik, was zu einer erhöhten Strahlungseffizienz η_S führt. Bei einem maximal einsehbaren Winkel zwischen 0° und 25° ist daher der Einsatz der Top Emitter Architektur (OLED 5, 6) zu raten, da in diesem Bereich keine wahrnehmbaren Helligkeitsunterschiede festgestellt werden konnten. Für größere Winkel zeigt sich alleinig der Bottom Emitter mit Glas Substrat (OLED 3, 4) stabil.

Die Auswahl der richtigen Architektur ist demnach eine hochgradig applikationsabhängige Entscheidung. Pauschal kann formuliert werden, dass je kleiner der einsehbare Emissionswinkelbereich der verbauten OLED ist, der z.B. stark durch die Einbaulage und im Speziellen die Einbautiefe in der Leuchte beeinflusst wird, umso gerichteter darf und sollte auch die Abstrahlcharakteristik sein. Eine gerichtete Abstrahlcharakteristik kann so zur Optimierung des Thermo- bzw. gesamten Energiemanagements beitragen.

Die Diskussion gewinnt an enormer Komplexität, wenn nicht von 2D OLED Bauteilen oder nur leicht gekrümmten Emittlern ausgegangen wird. Ein Design wie in Abb. 2.7a dargestellt erfordert eine Optimierung der Abstrahlcharakteristik und somit der Technologie im Hinblick auf das Design.

3 Bisherige Forschung zu Helligkeit von Heckleuchten

Mit der Erforschung der optimalen Helligkeit von Schlussleuchten wurde sich bereits in der Vergangenheit beschäftigt. Dieses Kapitel liefert eine chronologische Zusammenfassung der Studien. Hierbei wurden zur besseren Einordnung der Resultate für das Schlusslicht ebenfalls Untersuchungen zur Wahrnehmung des Bremslichtsignals und Richtungsanzeigers berücksichtigt und Erkenntnisse aus Laborstudien sowie realen Studien mit statischem wie auch dynamischen Versuchsdesign¹ aufgenommen. Zunächst werden die Untersuchungen zu statischen Signalen und im Folgenden die Arbeiten zu dynamischen Signalen aufgeführt. Aufbauend auf der Literaturanalyse werden schließlich eigene Forschungsziele abgeleitet.

3.1 Statische Signale

In diesem Unterkapitel werden die Arbeiten zu statischen Signalen zusammengefasst. Als statisches Signal sind die Lichtfunktionen Schlusslicht, Bremssignal und Richtungsanzeiger in ihrer klassischen, konstant dargebotenen Funktion zu verstehen.

¹In statischen Versuchen ruht während der Bewertungen sowohl der Proband als auch die Leuchte. In dynamischen Studien kann der Proband oder das zu bewertende Leuchtenmodell in Bewegung sein. Ein Beispiel hierfür ist die Bewertung der Leuchtenhelligkeit aus einem fahrenden Fahrzeug.

3.1.1 Cole und Brown [28] 1968

Cole und Brown [28] untersuchten die optimale Helligkeit von roten Signalen in Abhängigkeit der Umfeldleuchtdichte und Signalgröße. Hierzu benutzten sie einen **Labora Aufbau** aus Leuchtstoffröhren hinter einer opalen Abdeckung.

In einem ersten Versuch wurde die Umfeldleuchtdichte im Bereich von **5 cd/m²** bis **7709 cd/m²** variiert ². Das Signal wurde vor dem Schirm platziert und für jenen Versuch auf eine Größe von **0,09°** eingestellt. In einem weiteren Versuch wurde das Signal in den Größen **0,07°**, **0,09°**, **0,14°**, **0,18°** und **0,28°** dargeboten. Hierzu wurde eine feste Umfeldleuchtdichte von **2056 cd/m²** gewählt. Zur Bewertung der Signale nahm ein Proband **4 m** vor dem Aufbau platz. Beurteilt wurden unter insgesamt 50 Darbietungen jeweils 10 verschiedene Intensitäten.

Nach Aufleuchten des Signals wurde die Reaktionszeit der Versuchsperson aufgezeichnet. Hierbei war der Proband angewiesen ein zunächst gedrücktes Gaspedal zu lösen. Eine niedrige Reaktionszeit, bzw. Zeit bis zum Lösen des Pedals, wurde hierbei als Darbietung der optimalen Signalhelligkeit interpretiert.

Als Nebenaufgabe diente ein oszillierendes Target vor dem Schirm. Mittels eines Lenkrades sollte der Proband versuchen, eine Klammer am Schirm stets so einzustellen, dass diese das Target umgibt.

Insgesamt nahmen an den beiden Studien zur Untersuchung des Einflusses der Signalgröße und Untersuchung der Umfeldleuchtdichte 20 Personen im Alter von 17 bis 24 Jahren teil.

Cole und Brown [28] fanden dabei heraus, dass die optimale Helligkeit unabhängig von der Signalgröße ist. Für den Fall, dass die Signalhelligkeit jedoch unterhalb der optimalen Helligkeit liegt, bezeichnen Cole und Brown [28] das kleinere Signal als effektiver. Zudem analysieren sie, dass die optimale Helligkeit eine lineare Funktion der Umfeldleuchtdichte oberhalb von 34 cd/m^2 darstellt.

Als optimales Intervall schlagen Cole und Brown [28] einen Bereich zwischen **150 cd** und **300 cd** vor. Unter Einbezug möglicher Rotblindheit empfehlen sie jedoch nicht den unteren der beiden Werte. Zur Berechnung optimaler Helligkeiten in Abhängigkeit des Abstandes raten Cole und Brown [28] zur Anwendung des

²Cole und Brown [28] weisen hierbei auf eine nicht vollständig homogene Leuchtdichteverteilung hin.

quadratischen Entfernungsgesetzes.

3.1.2 Mortimer [73] 1970

Studie im Freien

Mortimer [73] untersuchte die optimalen Helligkeiten und Einflüsse verschiedener Farben der Signalfunktionen des Fahrzeughecks sowohl bei Tag als auch bei Nacht. Der Aufbau bestand aus insgesamt vier runden Leuchten mit einem Durchmesser von jeweils 10 cm. Drei Leuchten wurden direkt nebeneinander in einer Reihe auf einer Höhe von 60 cm und eine weitere Leuchte über jenen auf einer Höhe von 120 cm angeordnet, um ebenfalls die Einflüsse der Anbauhöhe zu untersuchen. Die Testleuchten wurden in einem ca. 1,2 m x 1,8 m großen grauen Gehäuse untergebracht, was einen Reflektionsgrad von 40% aufwies. Zur Darstellung mehrerer Farben konnten alle Leuchten mit einem Farbfilter versehen werden. Durch die Schaltung der Leuchten bzw. den Einsatz von Blenden wurden 5 verschiedene Leuchtflächengrößen realisiert: **26, 39, 81, 163 und 244 cm²**.

Die insgesamt 64 Probanden beurteilten die unterschiedlichen Gegebenheiten in einem Fahrzeug bei Beobachtungsabständen von **23 m** und **85 m**, wobei nicht jeder Proband alle Situationen bewertete. Gleichzeitig nahmen jeweils drei Probanden teil: Einer auf dem Fahrersitz und Beifahrersitz sowie ein weiterer auf dem mittleren Sitz der Fahrzeugrückbank.

Zur Beurteilung wurde das jeweilige Signal zunächst aufgedimmt bis das Signal „zweifelloso die Aufmerksamkeit erregt“ (bei Tag) bzw. als „definitiv zu hell“ (bei Nacht) eingestuft wurde. Die gleiche Prozedur ist sodann für einen abdimmenenden Verlauf wiederholt worden.

Die Bewertungen wurden nacheinander für die verschiedenen Distanzen durchgeführt. Für jede Distanz wurden nacheinander die Farben rot, orange, grün-blau und zusätzlich weiß untersucht. Innerhalb einer Farbe wurde die Position der Leuchte und die Flächengröße zufällig variiert.

Für die Umgebungsleuchtdichte bei Tag gibt Mortimer [73] unterschiedliche Werte an. So haben **4283 cd/m²** bei 28%, **4283 cd/m²** bis **8566 cd/m²** bei 56% und **8566 cd/m²** bis **12848 cd/m²** bei 16% der Versuche vorgelegen. Bei Nacht sei mit **eingeschaltetem Abblendlicht** des Bewertungsfahrzeuges verfahren wor-

40 Kapitel 3. Bisherige Forschung zu Helligkeit von Heckleuchten

den. Zusätzlich sei ein geringer Einfluss durch Straßenleuchten und Gebäude vorhanden gewesen.

Mortimer [73] konnte Einflüsse des Beobachtungsabstandes, der Signalfarbe und -größe sowie der Signalanbauhöhe auf die Bewertungen analysieren. Ebenfalls resultierte ein Unterschied der Bewertungen zwischen tagesähnlichen und nächtlichen Bedingungen. Den Effekt des Beobachtungsabstandes beschreibt Mortimer [73] insbesondere für die tagesähnlichen Bedingungen als gering.

Zwischen den unterschiedlichen Signalfarben konnten deutliche Unterschiede in der Bewertung festgestellt werden, wobei für ein grün-blaues Signal die niedrigsten und für ein weißes Signal die höchsten Intensitäten ermittelt wurden.

Im Falle der Signalgröße resultierte eine Bewertung hin zu höheren Leuchtdichten mit kleiner werdenden Leuchtflächen. Lediglich die Flächengröße von 26 cm^2 konnte nicht diesem Verhalten zugeordnet werden. Im Falle normalsichtiger Probanden konnte für das auf Augenhöhe angebaute Signal (120 cm^2) eine geringere mittlere Intensität im Vergleich zum identischen Signal auf 60 cm Höhe ermittelt werden.

Laborstudie

Zur weiteren Ermittlung der optimalen Helligkeiten für nächtliche und tagesähnliche Bedingungen führte Mortimer [73] eine zusätzliche Studie unter Laborbedingungen durch. Der technische Aufbau glich jenem des Experimentes im Freien. Die Beobachtungsentfernung wurde auf **23 m** eingestellt, wobei die Umgebungsleuchtdichte **45 cd/m²** betrug. 3 Personen nahmen an der Studie teil, die jeweils 5 Durchläufe absolvierten.

Diese zusätzliche Studie ergab, dass geringe Unterschiede zwischen den untolerierbaren Blendungsbewertungen der Laboruntersuchungen und nächtlichen Untersuchungen im Freien liegen und somit die Umgebungsleuchtdichte innerhalb dieser Bedingungen nur einen geringen Einfluss auf die Bewertung nimmt. Auf Grundlage seiner Ergebnisse schlägt Mortimer [73] eine Berechnungsmethode zur Ermittlung der maximalen und minimalen Lichtstärken für Tag und Nacht in Abhängigkeit der Flächengröße und Signalfarbe vor.

Für ein rotes Signal mit einer Leuchtfläche von **129 cm²** rät er für tages-

ähnliche Bedingungen zu einem Maximum von **2860cd** und einem Minimum von **372cd**. Für nächtliche Bedingungen empfiehlt Mortimer [73] eine maximale Lichtstärke von **234cd** und eine minimale Lichtstärke von **101cd**.

3.1.3 Schmidt-Clausen [89] 1983

Schmidt-Clausen [89] untersuchte die lichttechnischen Eigenschaften von Fahrzeugheckleuchten auf Basis der Fragenstellung:

- *Kann der Lichtstärkebereich von Bremsleuchten erhöht werden ohne hierbei andere Fahrer zu blenden?*
- *Darf der zulässige Lichtstärkebereich für Schlussleuchten als optimal aufgefasst werden?*
- *Innerhalb welches Toleranzbereiches sollten lichttechnische Anforderungen an Fahrzeuge diskutiert werden?*

Hierzu führte Schmidt-Clausen [89] statische Tests **im Freien** bei **Tag** und bei **Nacht** durch.

In den Untersuchungen wurde eine Leuchte in 0° direkt gegenüber der Probanden positioniert. In Beobachtungsabständen von **25m** und **100m** wurde die Bewertung verschiedener Signalhelligkeiten mittels 9-stufiger Skala (-4 bis +4, „zu dunkel“, „dunkel“ über „optimal“ bis „hell“, „zu hell“) vorgenommen.

Die zu bewertenden Leuchtflächengrößen betrugen hierbei **28cm²**, **64cm²** und **130cm²**. Jener Versuchsaufbau wurde sowohl für das Bremslichtsignal als auch das Schlusslicht verwendet. Bei der Konstruktion der Versuchsheuchten wurde auf eine möglichst homogene Leuchtdichtevertelung geachtet.

An den Studien bei Tag nahmen insgesamt 20 Personen teil, während bei den nächtlichen Untersuchungen 14 Probanden mitwirkten. Die Studien bei Tag wurden durch Störlichtquellen, wie das Sonnenlicht beeinflusst. Die nächtlichen Untersuchungen fanden bei eingeschaltetem Abblendlicht statt. Einen Einfluss von Störlichtquellen schließt Schmidt-Clausen [89] hierbei aus.

Schmidt-Clausen [89] analysiert, dass im Falle des Bremslichtes die gesetzlichen Anforderungen (zum Zeitpunkt der Veröffentlichung) von **40cd** bis **100cd**

bei tagesähnlichen Bedingungen als optimal angesehen werden können. Er gibt jedoch zu bedenken, dass sich unter dynamischen Bedingungen das Intervall nach oben verschieben kann. Für nächtliche Bedingungen empfiehlt er eine Herabsetzung des Intervalls auf **30 cd** bis **60 cd**. Schmidt-Clausen [89] stellt zudem einen linearen Zusammenhang zwischen der optimalen Leuchtdichte des Bremssignales und der Leuchtflächengröße fest. Mit steigender Flächengröße sinkt demnach die optimale Leuchtdichte des Signals.

Im Falle des Schlusslichtes analysiert Schmidt-Clausen [89] eine Abhängigkeit sowohl des Beobachtungsabstandes als auch der Leuchtflächengröße. Mit größer werdender Distanz steigen die optimalen Leuchtdichten und analog zur Bewertung des Bremslichtsignales kann bei größer werdenden Flächengrößen eine Tendenz zu sinkenden optimalen Leuchtdichten beobachtet werden. Die optimalen Lichtstärken bei Nacht liegen im oberen Bereich des (zum Zeitpunkt der Veröffentlichung) gesetzlichen Maximums von **12 cd**. Die Ergebnisse der Studien bei Tag liegen hierbei ca. um den **Faktor 3** höher.

3.1.4 Schmidt-Clausen [90] 1985

In einem ähnlichen Aufbau wie 1983 erweitert Schmidt-Clausen [90] das experimentelle Setup zur Durchführung teildynamischer Bewertungen. Hierzu wurden zwei Leuchten mit einem zentralen Fixationspunkt aus einem sich nähernden Fahrzeug aus beurteilt. Die Lichtstärke konnte hierzu in einem Bereich von 1 cd bis 1000 cd variiert werden. Die Tests wurden von 10 Probanden anhand der identischen 9-stufigen Skala wie bereits 1983 durchgeführt. Ebenfalls wurde bei den nächtlichen Untersuchungen das **Abblendlicht** eingeschaltet.

Für die Bremsleuchte mit einer Leuchtflächengröße von **20 cm²** gibt Schmidt-Clausen [90] eine optimale Lichtstärke von **18 cd** bei Nacht und **27 cd** bei Tag an. Steigt die Fläche auf **200 cm²**, so erhöhen sich diese Werte auf **117 cd** bzw. **140 cd**.

Im Falle des Schlusslichtes analysiert Schmidt-Clausen [90] bei nächtlichen Bedingungen für die **20 cm²** Fläche eine optimale Lichtstärke von **5,2 cd** und die **200 cm²** Fläche eine Lichtstärke von **24,3 cd**.

Mit wachsendem Beobachtungsabstand empfiehlt Schmidt-Clausen [90] zu-

dem eine Anpassung der Lichtstärke. So rät er zwischen 25 m und 125 m zu einer Erhöhung um 60% im Falle der 20 cm^2 Fläche und um 30% im Falle der 200 cm^2 Fläche.

In einer späteren Arbeit plädiert Schmidt-Clausen [91] insbesondere im Falle der Bremsleuchte die Leuchtdichte als Bewertungsgröße heranzuziehen. Er weist zudem darauf hin, dass hinreichende psychologische Blendung ein weiterer wichtiger Aspekt beim Bremsvorgang sei und eine Lichtstärkeabstufung zwischen Bremsleuchte zur Schlussleuchte allein nicht ausreiche.

3.1.5 Armbruster [10], [11] 2001

Laborstudie

Armbruster [11] untersuchte die optimale Helligkeit von Schlusslicht und Bremslicht sowie die Erkennbarkeitsschwelle des Schlusslichtes. Hierzu führte er zunächst eine Laborstudie durch und verglich die Wahrnehmung homogener und inhomogener Signale aus einzelnen Lichtpunkten anhand einer 9-stufigen Bewertungsskala (analog zu Schmidt-Clausen [91]).

Der Aufbau bestand aus einer Modellstraße im Maßstab 1:10, wobei die Darstellung der Signale mittels Durchlichtprojektion realisiert wurde. Die quadratische Leuchtfläche der Signale betrug **100 cm^2** . Die Normfarbwertanteile der Signale lagen bei $x = 0,702$ und $y = 0,298$. Die Versuche unter nächtlichen Bedingungen fanden mit Vorfeldausleuchtung und einer mittleren Leuchtdichte von **$0,1\text{ cd/m}^2$** statt. Bei den tagesähnlichen Studien gibt Armbruster [11] eine mittlere Leuchtdichte von **20 cd/m^2** im Vorfeld an und eine Umfeldleuchtdichte von **200 cd/m^2** .

Als Grundlage für seine Analyse befragte Armbruster [11] 5 Personen an zwei verschiedenen Tagen zu einer dargebotenen Leuchtdichte 3 mal.

Bei Nacht resultierte eine Erkennbarkeitsschwelle für das homogene Schlusslicht von $0,4\text{ cd/m}^2$. Die optimale Helligkeit des homogenen Schlusslichtes gibt er mit **20 cd/m^2** und des Bremslichtes mit **500 cd/m^2** an. Die Ergebnisse der Studien bei tagesähnlichen Bedingungen liefern im Nahbereich für das homogene Schlusslicht **50 fach** höhere Werte für die Schwelle und die optimale Helligkeit. Im Fernbereich nimmt die Schwelle um den Faktor 66 und die optimale Helligkeit

44 Kapitel 3. Bisherige Forschung zu Helligkeit von Heckleuchten

um den Faktor 21 zu. Die optimale Helligkeit des homogenen Bremslichtes steigt im Nahbereich um den Faktor 8 und im Fernbereich um das 6-fache. Im Falle der inhomogenen Signale erkennt Armbruster [11] keinen Einfluss auf die Bewertung der mittleren Signalleuchtdichte. Auf dieser Basis schlägt er unter Einbeziehung der optimalen Leuchtdichte L_{hom} von homogenen Signalleuchten folgende Formel zur Auslegung der Leuchtdichte L_{inhom} von n Punktlichtquellen mit dem Radius r innerhalb einer Leuchtenfläche der Größe A_L vor:

$$L_{inhom} = \frac{L_{hom} \cdot A_L}{\pi \cdot r^2 \cdot n} \quad (3.1)$$

Reale Versuche am Fahrzeug

Des Weiteren führte Armbruster [11] reale Versuche mit einem Fahrzeug durch. Hierzu brachte er ein Leuchtenmodell an einem Volvo 850 an, welches zum Vergleich aus einer LED-Leuchte, einer brillant transparenten Leuchte und einer Standardleuchte bestand. Der Abstand des jeweiligen Leuchtenpaares betrug 115 cm bei einer mittleren Anbauhöhe von 80 cm . Die Untersuchung bestand aus zwei Teilen: Einem Standversuch und einem Fahrversuch. Beim Standversuch saßen die Probanden in einem Fahrzeug mit eingeschaltetem Standlicht. Zur Bewertung wurden Beobachtungsabstände von **23 m**, **130 m** und **300 m** eingestellt. Während der Fahrversuche folgte das hintere Fahrzeug mit Abblendlicht in einem Abstand von **35 m** bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h .

Für den Standversuch ermittelt Armbruster [11] bei Nacht und einer Beobachtungsentfernung von **23 m** eine optimale Helligkeit von **170 cd/m²** für das homogene Schlusslicht und **2000 cd/m²** für das homogene Bremslicht. Er beobachtete zudem einen Anstieg der optimalen Helligkeit in den Untersuchungen bei Tag sowie eine Tendenz zu höheren Werten mit steigender Beobachtungsentfernung.

Für 5 weitere Testpersonen zwischen 55 und 65 Jahren analysiert Armbruster [11] bei Nacht optimale Leuchtdichten von **400 cd/m²** für das Schlusslicht und **1800 cd/m²** für das Bremslicht. Aus den Fahrversuchen ergaben sich bei Nacht optimale Leuchtdichten von **240 cd/m²** im Falle des homogenen Schlusslichtes und **2200 cd/m²** für das homogene Bremslicht. Die Bewertungen der inhomogenen Signale führte Armbruster [11] nur bei Nacht durch. Er konnte hierbei keinen wesentlichen Unterschied zu den Bewertungen der homogenen Signale feststel-

len. Armbruster [11] resümiert einen geringen Unterschied zwischen den Standversuchen und den dynamischen Versuchen, jedoch eine größere Diskrepanz zu den Laboruntersuchungen.

Untersuchungen bei Nebel und Regen

Die optimale Helligkeit von Schlusslicht und Bremslicht untersuchte Armbruster [10] (vgl. Armbruster [11]) zudem unter nebligen Bedingungen im **Labor**. Als Testobjekt dienten ebenfalls rechteckige Leuchten mit einer Kantenlänge von 10 cm und somit einer Leuchtfläche von jeweils 100 cm^2 . Bei einer Beobachtungsentfernung von 23 m wurden analog zu vorherigen Studien die Bewertungen auf Grundlage einer 9-stufigen Skala durchgeführt. Zur Bestimmung der durch den Nebel eingeschränkten Sichtweite wurde die Transmission eines Laserstrahls durch das Medium analysiert.

Armbruster [10] (vgl. Armbruster [11]) kommt zu dem Ergebnis, dass nachts bei einer Sichtweite von 14 m eine Leuchtdichte von 550 cd/m^2 zur optimalen Wahrnehmung der Schlusslichtfunktion führt. Zudem stellt er fest, dass unterhalb einer Sichtweite von 40 m die optimale Helligkeit exponentiell ansteigt, während darüber hinaus keine Veränderung zu beobachten ist. Dieses Verhalten konnte sowohl für die Schlusslichtfunktion als auch für das Bremslicht gezeigt werden. Zwischen Schlusslichtfunktion und Bremssignal liegt hierbei ca. der **Faktor 5**.

Bei ähnlichen Untersuchungen zum Einfluss von Regen auf die Empfindung der optimalen Helligkeit der Schlusslicht- und Bremslichtfunktion analysiert Armbruster [11], dass nachts die Signalfunktionen in Abhängigkeit der Regenintensität höher bewertet werden. Bei Tag konnte er hingegen keinen Unterschied feststellen, was er auf das erhöhte Adaptionniveau zurückführt.

Untersuchung der Einflüsse durch Blendung

Dem Einfluss auf die Helligkeitsbewertung von Heckleuchten durch Blendung aufgrund entgegenkommender Fahrzeuge widmete sich Armbruster [11] in einer **Laborstudie** und nutzte hierzu das zuvor beschriebene Leuchtenmodell und erneuert einen Beobachtungsabstand von 23 m .

Als Blendlichtquelle diente ein Scheinwerfer in Projektionstechnik, welcher

in einem Winkel von $8,1^\circ$; $4,1^\circ$; $2,7^\circ$ und $2,1^\circ$ neben der Modellleuchte variiert wurde. Während der Versuche konnte die Blendbeleuchtungsstärke am Auge aufgezeichnet werden. Zur Beurteilung standen erneut die bereits als optimal ermittelten Leuchtdichten aus den vorherigen Studien.

Armbruster [11] stellt fest, dass ab einer Blendbeleuchtungsstärke von 5 lx das Schlusslicht nicht weiter als optimal bewertet wird. Für das Bremslicht ermittelt er einen Schwellwert von 12 lx .

3.1.6 Ripperger [83], [84] 2001

Leuchtdichtevergleich

Ripperger [84] (vgl. [83]) stellte bei der Untersuchung von 70 Schlusslicht und Bremslicht Signaturen eine Überlappung der mittleren Leuchtdichten zwischen Schlusslicht und Bremslicht fest. Dies führt er auf die gesetzliche Auslegung auf der Basis von Lichtstärkewerten zurück. Er plädiert daher für die Verwendung der Leuchtdichte als lichttechnische Größe für die Gesetzgebung.

1. Laborstudie

Ripperger [84] (vgl. [83]) analysierte die optimale Helligkeit von Schlusslicht und Bremslichtsignal unter nächtlichen Bedingungen. Im Maßstab von 1:10 wurden im Labor straßenähnliche Verhältnisse simuliert. 5 Probanden bewerteten zwei rechteckige Testobjekte, die auf einen **8 m** entfernten Projektionsschirm gestrahlt wurden. Die Umfeldleuchtdichte betrug **$1,6\text{ cd/m}^2$** .

Die Größe der Testobjekte wurde in 10 Stufen innerhalb eines Schwinkels von $1,7'$ bis $30'$ (**$0,03^\circ$** bis **$0,5^\circ$**) variiert. Zur Bewertung wurde die Leuchtdichte der Testobjekte so lange erhöht, bis der Proband das Erreichen der optimalen Helligkeit der Schlusslichtfunktion bzw. des Bremssignales signalisierte.

Entgegengesetzt zu Schmidt-Clausen [91], der die psychologische Blendung als wichtigen Aspekt beim Bremsvorgang wertet, stuft Ripperger [84] (vgl. [83]) das Bremslicht als deutliches Warnsignal ein, bei dem gerade eben keine Blendung auftritt. Die Resultate der Studie vergleicht Ripperger [84] mit den Gesetzen nach Weber-Fechner und Ricco. Durch Interpolation seiner Daten mit der Theo-

rie erhält er einen Grenzwinkel, der die Bereiche nach Weber-Fechner und Ricco trennt. Im Falle des Schlusslichtes beträgt dieser $4,5'$ ($0,08^\circ$) und für das Bremslicht $5,5'$ ($0,09^\circ$).

Für die optimale Helligkeit eines Schlusslichtes gibt Ripperger [83] **9 cd/m^2** und für das Bremslicht **400 cd/m^2** an. Bei Versuchen unter tageslichtähnlichen Bedingungen und einer Umgebungsleuchtdichte von **2000 cd/m^2** erhält Ripperger [83] als optimale Helligkeit für das Schlusslicht **1000 cd/m^2** und für das Bremslicht **14000 cd/m^2** .

2. Laborstudie

Analog zum Vorgehen von Schmidt-Clausen [91] und Armbruster [10], [11] wird in einer weiteren Studie von Ripperger [84] (vgl. [83]) die optimale Helligkeit von Schluss- und Bremslicht auf Grundlage einer 9-stufigen Skala bewertet. Hierzu wurden den Probanden zur Einstufung 12 verschiedene Leuchtdichteniveaus in einem Bereich von $0,6\text{ cd/m}^2$ bis 2000 cd/m^2 für das Schlusslicht und 10 cd/m^2 bis 60000 cd/m^2 für das Bremslicht präsentiert.

Es konnte für das Schlusslicht eine optimale Helligkeit von **50 cd/m^2** und für das Bremslicht ein Wert von **1100 cd/m^2** ermittelt werden. Bei tagesähnlichen Bedingungen analysiert Ripperger [83] eine optimale Helligkeit von **10000 cd/m^2** für das Schlusslicht und **43000 cd/m^2** für das Bremslicht.

Dynamische Feldversuche

Zusätzlich untersuchte Ripperger [83] die optimale Helligkeit von Schluss- und Bremsleuchten im dynamischen Straßenverkehr. Hierzu diente ein Leuchtenpaar aus jeweils zwei Kammern mit einer Leuchtfläche von **100 cm^2** , was an ein Fahrzeug montiert wurde. Als Lichtquelle dienten Glühlampen, die hinter einer Streuscheibe montiert waren. Die resultierenden Normfarbwertanteile gibt Ripperger [83] mit $x = 0,67$ und $x = 0,328$ an.

Die Probanden folgten den Modellleuchten mit einem weiteren Fahrzeug in einem Abstand von **50 m** und einer Geschwindigkeit von **50 km/h** , wobei ein 9-stufiges Bewertungsverfahren analog zu vorangegangenen Studien gewählt wurde. Die 12 zu bewertenden Signalleuchtdichten bewegten sich während der Studi-

en bei Nacht zwischen 10 cd/m^2 und 5700 cd/m^2 und bei Tag zwischen 500 cd/m^2 und 43000 cd/m^2 .

Als Ergebnis erhält Ripperger [83] optimale Schlusslichthelligkeiten von **450 cd/m^2** und **7500 cd/m^2** für nächtliche Bedingungen und bei Tag. Für das Bremslicht ermittelt er **1700 cd/m^2** bei Nacht und **20000 cd/m^2** bei Tag.

3.1.7 Mócko et al. [71] 2009

Mócko et al. [71] beschäftigten sich mit der optimalen Helligkeit des Bremssignals unter Anbetracht der Leuchtdichtekontraste zum Leuchtenumfeld. Zur Ermittlung wurden die **realen Bedingungen**

- *nachts auf der Straße, mit Straßenbeleuchtung*
- *während des Tages bei wolkenlosen Bedingungen*
- *während des Tages bei wolkigen Bedingungen*

untersucht. Mittels Leuchtdichtekamera konnten zunächst die Umfeldleuchtdichten der einzelnen Szenarien bestimmt werden und sodann getrennt die Leuchtdichteverteilungen der Heckleuchten. Zur Vereinfachung wurde die Umfeldleuchtdichte als Mittel aller Werte um die Leuchte berechnet. Die Kontraste 15 verschiedener Fahrzeuge unterschiedlichen Alters wurden ermittelt. Als theoretisches Bewertungskriterium diente die Beziehung

$$L_S = c \cdot L_U^{0,44} \quad (3.2)$$

mit der Signalleuchtdichte L_S , die abhängig von der Umfeldleuchtdichte L_U als obere Schwelle zu blendenden Werten interpretiert wird. Die Konstante c ist hierbei abhängig vom Testaufbau und berücksichtigt zudem die speziellen Eigenschaften der Probandengruppe.

Mócko et al. [71] stellten fest, dass für die nächtlichen Bedingungen alle experimentellen Werte $> L_S$ sind, was sie folglich als blendend bzw. unangenehm einstufen. Für die Tests während des Tages bei wolkenlosen Bedingungen wurden alle Bremssignale als nicht blendend bewertet. Die Resultate für bewölkte Bedingungen bei Tag lagen nahe der theoretischen L_S Werte nach Gl. (3.2).

Zur weiteren Auswertung formulieren Mócko et al. [71] eine untere Schwelle aus den Kontrastverhältnissen von L_U und L_S . Hierbei nehmen sie einen Faktor $\frac{L_S}{L_U} = 1,5$ unter Verweis auf die Recherchen von Sivak et al. [95] an. Bei nächtlichen Bedingungen zeigten sich für alle Fahrzeuge ausreichende Kontraste, während am Tag bei wolkigem Himmel 5 Fahrzeuge und wolkenlosem Himmel 7 Fahrzeuge unterhalb der Schwelle liegen, was nach Mócko et al. [71] zu gefährlichen Verkehrssituationen führen kann.

Aus den Analysen empfehlen die Autoren final eine Lichtstärke des Bremsignals von **60 cd** bei einer Leuchtdichte von **10000 cd/m²** als Kompromiss für den Tag und die Nacht.

3.1.8 Kaltenbach [53], [54] 2009

Laboraufbau

Kaltenbach [54] (vgl. [53]) untersuchte die optimale Helligkeit von Heckleuchten mittels eines Laboraufbaus. Hierzu nutze er eine Lichtwand mit einer Breite von 10 m und einer Höhe von 5 m. Diese bestand aus 34 Reihen mit 6 Leuchtkörpern, die aus jeweils 2 fluoreszierenden Leuchten bestanden, um realitätsnahe Umfeldleuchtdichten einzustellen. Die Auswahl der Bedingungen geht hierbei auf eine vorherige Arbeit [52] (vgl. [53]) zurück.

Zur Bewertung wurden die Versuchspersonen in einer Entfernung von **6,2 m** positioniert. Es wurde eine leuchtende Fläche von **625 mm²** gewählt, um einen äquivalenten Schwinkel für eine **100 cm²** große Fläche bei **25 m** herzustellen.

Die Untersuchungen wurden mit 28 männlichen und 10 weiblichen Probanden mit einem mittleren Alter von 36,8 bzw. 32 Jahren durchgeführt. Zur Bewertung wurde eine 5-stufige Skala von 1 (zu dunkel) über 3 (optimal) bis 5 (zu hell) verwendet. Unter 15 verschiedenen Tag bzw. Nacht Bedingungen und somit Umfeldleuchtdichten wurden mit Hilfe der Skala Bewertungen für das Schlusslicht, Bremslicht (inklusive hochgesetzter Bremsleuchte) und den Richtungsanzeiger vorgenommen. Die dargebotenen Lichtstärkewerte bewegten sich hierbei für das Schlusslicht in einem Bereich von $4\text{ cd} - 25\text{ cd}$, für das Bremslicht in einem Bereich von $60\text{ cd} - 520\text{ cd}$ ($25\text{ cd} - 115\text{ cd}$ im Falle der hochgesetzten Bremsleuchte) und für den Richtungsanzeiger in einem Bereich von $50\text{ cd} - 700\text{ cd}$.

50 Kapitel 3. Bisherige Forschung zu Helligkeit von Heckleuchten

Kaltenbach [54] (vgl. [53]) empfiehlt auf Grundlage seiner Studienergebnisse die adaptive Anpassung der untersuchten Heckleuchtenfunktionen in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen bzw. Umfeldleuchtdichte L_U . Er schlägt folgende Beziehung zur Anpassung der Signalleuchtdichte L_{opt} vor:

$$L_{opt} = a \cdot (b + c \cdot L_U^{0,5}). \quad (3.3)$$

Die von Kaltenbach [53] für die Konstanten der Parameter a , b und c ermittelten optimalen Werte sind in Tab. 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Zusammenfassung der Parameter a , b und c aus Gl. (3.3). Ergebnisse von Kaltenbach [53].

Funktion	a	b	c
Schlussleuchte	8,4249	111,7131	8,8414
Bremsleuchte	15,5984	756,6351	25,5735
Fahrtrichtungsanzeiger	19,5026	725,0133	33,3938

Versuche unter realen Bedingungen

Einen weiteren statischen Versuch führte Kaltenbach [53] zur näheren Untersuchung der optimalen Helligkeiten unter realen Bedingungen durch. Zur Bewertung von Bremslicht und Richtungsanzeiger wurde die linke LED Heckleuchte eines BMW 3er Cabrio verwendet, wobei die LEDs mit einer PWM-Frequenz von 152Hz angesteuert wurden. Der Richtungsanzeiger wurde bei den Untersuchungen sowohl konstant als auch blinkend mit einer Impulsdauer von 320ms dargeboten.

Die Studien unter **nächtlichen Bedingungen** fanden im völlig abgedunkelten Lichtkanal der BMW AG statt. Die Umgebungsleuchtdichte wurde hierbei durch das Abblendlicht eines Halogenscheinwerfers eingestellt. Für die Studien bei **tagsähnlichen Bedingungen** wurde eine unbefahrene gerade Straße gewählt.

Die Bewertungen fanden bei Beobachtungsabständen von **25 m** und **40 m** statt und wurden anhand einer 5-stufigen Skala, analog zu vorherigen Laborversuchen, durchgeführt. Als Fixationspunkt wurde den Probanden das BMW Emblem auf

der Heckklappe vorgegeben.

Bei der Auswertung der Daten stellt Kaltenbach [53] nur geringe Einflüsse des Beobachtungsabstandes fest. Bei nächtlichen Bedingungen analysiert er für das Bremslicht eine optimale Helligkeit von **16900 cd/m²** für den konstant dargebotenen Richtungsanzeiger eine Leuchtdichte von **26000 cd/m²** und für die blinkende Variante einen Wert von **20800 cd/m²**. Im Falle der Untersuchungen bei Tag verweist Kaltenbach [53] auf die Ergebnisse der vorherigen Laborstudie und Gl. (3.3).

3.1.9 Köth [58] 2009

Köth [58] untersuchte die Einflüsse des Phantomeffektes³ auf die Wahrnehmung des Fahrtrichtungsanzeigers und der Bremsleuchte. Zur Ermittlung der veränderten Helligkeitswahrnehmung führte er eine **Laborstudie** durch.

Die zu bewertende Leuchte wurde aus 10° im Abstand von ca. 24 m mit einer Lichtquelle nach Normlichtart D65 bestrahlt. Zur Bewertung sollte der Proband das Erkennen des Bremslichtes oder Richtungsanzeigers nach Aufleuchten bestätigen. Die Fremdlichtquelle wurde hierbei randomisiert zugeschaltet.

Im Falle des Fahrtrichtungsanzeigers stellt Köth [58] eine bis um den Faktor 3 erhöhte Reaktionszeit durch den Fremdlicheinsatz fest. Diese Erhöhung fällt für das Bremslicht weniger gravierend aus. Auf der Grundlage der experimentellen Ergebnisse von Köth [58] schlagen Schwenkschuster und Vollmer [92] ein Verfahren zur Simulation des Einflusses des Phantomeffektes vor.

3.1.10 Tatsumoto et al. [101] 2013

Tatsumoto et al. [101] erforschten in ihren Studien die Auswirkung von 3 LED Bremsleuchten mit verschiedener Homogenität auf das Blendempfinden. Die erste Leuchte wies 9 und die zweite 25 einzeln erkennbare LEDs auf, während die dritte Leuchte eine homogene Fläche mit leichter tonnenförmiger Verzeichnung darstellte.

³Die Einstrahlung von Fremdlichtquellen, wie z.B. der Sonne auf die Heckleuchte, kann zu sichtbaren Spiegelungen und Reflektionen führen. Jene Auswirkungen werden als Phantomeffekte bezeichnet.

52 Kapitel 3. Bisherige Forschung zu Helligkeit von Heckleuchten

15 der Probanden waren Migränepatienten, während 14 Studienteilnehmer ohne Migräne Befund waren. Zur Bewertung der Leuchten nahmen die Testpersonen in einem Fahrzeug Platz. Ihr Abstand zu den Leuchten betrug hierbei **5 m**. Die Augenhöhe der Probanden wird von Tatsumoto et al. [101] mit $1,2\text{ m}$ angegeben und die Anbauhöhe der zu bewertenden Leuchten mit $0,7\text{ m}$. Dargeboten wurden jeweils 7 verschiedene Helligkeitswerte, die mittels einer 5-stufigen Skala bewertet wurden. Die Darbietungszeit betrug 5 s für jeden Wert mit einer Pause von jeweils 15 s zwischen den Darbietungen. Die Untersuchungen wurden unter **abgedunkelten Bedingungen** durchgeführt. Zum Abschluss des Studiendurchlaufes wurde jeder Proband um die Benennung der unangenehmsten unter den 3 bewerteten Leuchten gebeten.

Die Analyse der Tests zeigt, dass die inhomogenen Leuchten bzgl. ihrer Blendwirkung als unangenehmer eingestuft werden. Die Migräne Patienten zeigten generell ein erhöhtes Blendempfinden gegenüber der beschwerdefreien Probanden.

Die zweite Leuchte aus 25 LEDs wurde durch die Probanden in der abschließenden Befragung generell als am unangenehmsten eingestuft. Um Attacken bei Migräne Patienten vorzubeugen, empfehlen Tatsumoto et al. [101] daher den Einsatz homogener Bremsleuchten.

3.1.11 Tiecheng et al. [102] 2017

Tiecheng et al. [102] beschäftigten sich in ihren Untersuchungen mit der Frage, ob inhomogene hochgesetzte Bremsleuchten eine erhöhte Blendung im Vergleich zu homogenen Leuchten verursachen. In einer Studie wurden 20 Personen im Alter zwischen 21 und 55 und einem mittleren Alter von 35 Jahren befragt. Die Umgebungshelligkeit wurde nächtlichen Bedingungen angepasst und betrug **1 lx**.

Zwei Fahrzeuge wurden in einem Abstand von 1 m hintereinander positioniert, sodass sich für die Testperson im hinteren Fahrzeug eine Beobachtungsentfernung von **3,2 m** ergab. Zur Bewertung standen 3 verschiedene Leuchten mit identischer Form, Größe und Leuchtfläche. Tiecheng et al. [102] unterschieden diese als „dotted style“, „dotted style with diffuse film“ und „glowing body“, welcher die homogenste Variante darstellte.

Zur Aufzeichnung der Lichtstärke bzw. Beleuchtungsstärke während der Tests

wurde ein Luxmeter auf Höhe der Probanden installiert. Ebenfalls wurde eine Leuchtdichtekamera zur Vermessung der Leuchtdichtevertelung eingesetzt.

Nach einer Adaptionszeit von 20s wurden zur Bewertung verschiedene Helligkeiten für jeweils 3 s dargeboten, die mittels De Boer Skala eingestuft wurden.

Die Ergebnisse zeigen eine abnehmende Blendwirkung mit zunehmender Homogenität der Leuchte. Tiecheng et al. [102] analysieren zudem, dass die Blendung mit der absoluten Leuchtdichte sowie mit steigenden Leuchtdichtegradienten zunimmt.

3.1.12 Zandi et al. [114] 2017

Zandi et al. [114] untersuchte den optimalen Helligkeitsbereich von Heckleuchtsignalen unter **mesopischen Bedingungen**. In einer **Laborstudie** diente ein homogenes, quadratisches und rundes Signal zur Bewertung. Durch die Veränderung der Signalgröße mit Blenden wurde der Sehwinkel zu den in **2m** entfernten Probanden zwischen $1,43^\circ$ und $0,057^\circ$ variiert. Auf diese Weise konnte ein Beobachtungsabstand zwischen **2m** und **50m simuliert** werden.

Zur Bewertung wurde jedes Szenario jeweils 600ms präsentiert. Zwischen den Sequenzen lag eine Pause von 3000ms, um Adaptionseffekte zu vermeiden. Die Umfeldleuchtdichte lag bei **2,45 cd/m²**.

17 Probanden im Alter von 22 bis 34 Jahren bewerteten die optimale Helligkeit des quadratischen Signales anhand der Herstellmethode. In einem weiteren Testlauf stellten 15 Probanden im Alter zwischen 15 und 34 Jahren mittels Staircase Methode die optimale Helligkeit des quadratischen und kreisförmigen Signals für verschiedene Signalgrößen bzw. Sehwinkel ein.

Zur weiteren Untersuchung des Einflusses der Signalgröße auf die Wahrnehmung der optimalen Helligkeit wurde eine direkte Methode angewendet. Hierzu wurden in einem ersten Durchlauf die Größe des Signals mit Blenden variiert und in einem zweiten Durchlauf zwei Signale unterschiedlicher Größe dargeboten. Die mittlere Leuchtdichte der Signale wurde hierbei jeweils auf konstante $217,07 \text{ cd/m}^2$ bzw. $24,37 \text{ cd/m}^2$ eingestellt. 23 Probanden wurden sodann um die Einschätzung der Helligkeitsunterschiede zwischen den verschiedenen Signalgrößen gebeten.

54 Kapitel 3. Bisherige Forschung zu Helligkeit von Heckleuchten

Aus den durchgeführten Untersuchungen mit der Herstellmethode ergibt sich nach Zandi et al. [114] eine steigende mediane Leuchtdichte hin zu fallenden Sehwinkeln begleitet von einer steigenden Varianz der Daten. Ein signifikanter Einfluss des Sehwinkels auf die Bewertung der optimalen Helligkeit kann jedoch nicht festgestellt werden.

Die Ergebnisse bestätigen sich in den Untersuchungen mit der Staircase Methode. Hierbei liegen die optimalen Helligkeiten des quadratischen höher als jene des kreisförmigen Signals. Es kann aus dem Vergleich zudem ein signifikanter Einfluss der Geometrie auf die Bewertung der optimalen Helligkeit ermittelt werden.

Zandi et al. [114] analysiert auf Grundlage jener Daten einen optimalen Helligkeitsbereich zwischen **13,52 cd/m²** und **56,93 cd/m²**.

Die direkte Methode zeigt im Falle einer Signalleuchtdichte von 217,07 cd/m² einen wahrnehmbaren Helligkeitsunterschied mit Variation der Signalgröße auf. Für eine Signalleuchtdichte von 24,37 cd/m² kann dieser Effekt nicht beobachtet werden.

3.1.13 Polin und Khanh [80] 2017

Polin und Khanh [80] erforschten die visuelle Wahrnehmung von Heckleuchten im Bezug auf folgende Fragenstellung:

- *Welche technischen Parameter und Umfeldeinflüsse haben einen substantielle Effekt auf die visuelle Wahrnehmung?*
- *Wo liegen die Grenzen dieser Parameter um optimale Adaption sicherzustellen?*
- *Welche photometrische Größe ist am geeignetsten um die Anforderungen zu erfüllen?*

1. Feldstudie

In einer ersten Studie wurde die optimale Helligkeit von Schlusslicht, Bremslicht und Richtungsanzeiger bei **Nacht** untersucht. Hierzu wurden unter realen Bedingungen auf einem Testgelände jeweils zwei Fahrzeuge hintereinander aufgestellt.

Im hinteren Wagen wurden die Probanden zur Bewertung der Signalhelligkeiten platziert.

Während der Bewertungen wurde das Abblendlicht des Probandenfahrzeuges aktiviert. Ein Bewertungsdurchgang wurde jeweils gleichzeitig von Fahrer und Beifahrer durchgeführt. Diese wurden angewiesen in die linke bzw. rechte Leuchte des vorderen Fahrzeuges zu schauen. Die Tests wurden bei Beobachtungsentfernungen von **5 m**, **20 m**, **50 m**, und **100 m** durchgeführt.

Bei jeder Entfernung wurden 5 Helligkeitslevel bewertet und jedes Level in einer zufälligen Reihenfolge jeweils dreimal für eine Dauer von 5 s dargeboten. Die Bewertungen wurden anhand einer 9 stufigen Skala vorgenommen.

Die Studie fand mit 22 Probanden statt, unter welchen 9 eine Brille bzw. Kontaktlinsen trugen.

Polin und Khanh [80] konnten keine statistisch signifikanten Differenzen zwischen den Bewertungen unterschiedlicher Leuchten mit unterschiedlichen Geometrien feststellen, jedoch einen Einfluss der Lichtstärke und Beobachtungsentfernung auf die Bewertung der Probanden. Auch Polin und Khanh [80] analysieren mit steigender Beobachtungsentfernung eine erhöhte interpersonelle Streuung bzw. Varianz der Datensätze sowie wachsende mediane Leuchtdichten (vgl. Zandi et al. [114]).

Aufgrund ihrer Ergebnisse empfehlen sie eine Reduktion der Lichtstärke des Bremslichtes auf den gesetzlich notwendigen Minimumwert von **60 cd**, insbesondere in Stausituationen und Stadtverkehr. Ähnliche Ergebnisse erhalten Polin und Khanh [80] bei der Analyse der Bewertungen des Richtungsanzeigers. Auch hier wird eine Reduzierung der Lichtstärke auf das gesetzliche Minimum empfohlen. Im Falle des Schlusslichtes kann hingegen nur ein geringer Einfluss der Beobachtungsentfernung auf die Bewertungen festgestellt werden. Einen konstanten Wert von **4 cd** halten Polin und Khanh [80] daher für angemessen.

2. Feldstudie

In einer weiteren Arbeit beschäftigten sich Polin und Khanh [80] im Speziellen mit der Blendung des Bremslichtes bei **Nacht** unter Verwendung des zuvor beschriebenen experimentellen Setups. In diesem Fall wurden jedoch 6 Helligkeits-

level mit einer maximalen Lichtstärke von 254 cd jeweils zehnmal dargeboten. Die Beobachtungsentfernungen wurden mit **3 m**, **15 m**, **65 m** und **100 m** gewählt. Die Darbietungen wurden jeweils mit „blendend“ oder „nicht blendend“ charakterisiert. 24 Probanden nahmen an der Studie teil.

Polin und Khanh [80] analysieren, dass mit wachsender Beobachtungsentfernung die Blendung abnimmt. Die aus der vorherigen Studie vorgeschlagene Lichtstärke Empfehlung von **60 cd** bestätigt sich auch in diesen Untersuchungen. Polin und Khanh [80] stellen lediglich eine Blendung in einem von fünf Fällen bei einer Lichtstärke zwischen 60 cd und 80 cd fest.

3. Feldstudie

In weiteren Tests untersuchten Polin und Khanh [80] bei erneut identischem Aufbau die optimale Helligkeit von Bremslicht und Richtungsanzeiger bei **Tag**. Durch eine tiefstehende Sonne wurde eine hohe Umfeldleuchtdichte erzeugt. Als Beobachtungsentfernungen wurden **5 m**, **35 m** und **70 m** eingestellt. 20 Probanden bewerteten in diesem Fall die dargebotene Situation als „zu dunkel“, „optimal“ oder „blendend“.

Im Falle des Bremslichtes analysieren Polin und Khanh [80] bis zu einer Beobachtungsentfernung von 10 m den nach ECE zulässigen Maximalwert von **260 cd** noch als optimal, darüber hinaus hingegen als zu dunkel. Die maximal zulässige Lichtstärke für eine adaptive Leuchte von **730 cd** hingegen wird bis zu einer Entfernung von 40 m als blendend empfunden, darüber hinaus jedoch als optimal angesehen. Polin und Khanh [80] empfehlen daher eine adaptive Anpassung im Bereich jener beiden Lichtstärkewerte in Abhängigkeit des Abstandes.

Im Falle des Richtungsanzeigers schlagen Polin und Khanh [80] eine Orientierung an dem maximal zulässigen Lichtstärkewert für einen adaptiven Richtungsanzeiger von **1000 cd** vor. Jener Wert liegt für die untersuchten Beobachtungsdistanzen bis 70 m im optimalen Bereich. Polin und Khanh [80] weisen jedoch darauf hin, dass mit steigender Distanz auch die vorgeschlagenen 1000 cd als zu dunkel empfunden werden könnten und daher eine adaptive Regelung nötig werden könnte.

Der Vergleich zwischen den Untersuchungen bei Tag und Nacht zeigt laut Polin und Khanh [80] die Notwendigkeit adaptiver Leuchten auf. Sie geben ins-

besondere auch die Empfehlung für eine Absenkung der gesetzlichen minimalen Lichtstärkewerte für die nächtlichen Bedingungen und eine Anhebung der Maximalwerte für den optimalen Betrieb bei Tag.

3.1.14 Ries et al. [82] 2017

Die optimale Helligkeit von Bremsleuchten in **realen Fahrsituationen** bei **Nacht** untersuchten Ries et al. [82]. Die Studie wurde auf Landstraßen durchgeführt und bestand aus einem vorausfahrenden und einem folgenden Fahrzeug. Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge wurde mit 70 km/h gewählt.

Zur Bewertung führte das vorausfahrende Fahrzeug periodische Bremsungen durch, die im hinterherfahrenden Fahrzeug in einem Abstand von **35 m** bewertet wurden (vgl. Aufbau der dynamischen Studie von Armbruster [11]).

An fünf Abenden wurde jeweils mit 2 Personen (Fahrer und Beifahrer) getestet. Es wurden zufällig 6 verschiedene Helligkeiten (40 cd , 60 cd , 106 cd , 151 cd , 199 cd , 254 cd) dargeboten. Nach jedem Bremsvorgang wurde die Helligkeit anhand einer 3-stufigen Skala (zu dunkel, optimal, blendend) bewertet. Für die Bewertungsstufe „zu dunkel“ wurde zur Orientierung eine Helligkeit beschrieben, die mit dem Schlusslicht verwechselt werden könne. Insgesamt konnten auf diese Weise pro Abend 136 Beurteilungen aufgezeichnet werden. Die Personen werteten hierbei jeweils zweimal, als Fahrer und als Beifahrer.

Signifikante Unterschiede in den Bewertungen zwischen Fahrer und Beifahrer konnten Ries et al. [82] nicht nachweisen. Zumeist wurden die Lichtstärken von **106 cd** und **151 cd** als optimal bewertet. Als obere Grenze definieren Ries et al. [82] einen Wert von **200 cd**.

3.1.15 Scheer et al. [87] 2017

Die Empfindung der Helligkeit des Bremslichtes und Richtungsanzeigers bei Einfluss von Gegenverkehr analysierten Scheer et al. [87] in **nächtlichen Situationen**. Hierzu wurde auf einem Flughafengelände ein statisches Setup aus drei Fahrzeugen aufgebaut. Zwei Fahrzeuge wurden in Fahrtrichtung hintereinander positioniert, während ein drittes mit angeschaltetem Abblendlicht auf der Gegenfahrbahn zur Simulation von Gegenverkehr diente.

58 Kapitel 3. Bisherige Forschung zu Helligkeit von Heckleuchten

Die Bewertung der Helligkeit wurde für einen Beobachtungsabstand von **3m** und **35m** durchgeführt. Im Falle eines Beobachtungsabstandes von $3m$ wurde das Fahrzeug auf der Gegenseite in gleicher Höhe zum vorauspositionierten Fahrzeug aufgestellt. Für die Tests bei $35m$ wurde für das Fahrzeug eine Distanz von $10m$ gewählt.

Zur Bewertung wurde eine 3-stufige Skala (zu dunkel, hell genug, blendend) gewählt, wobei die Probanden instruiert wurden während der Tests auf das Nummernschild zu schauen. Dargeboten wurden 6 verschiedene Lichtstärken im Bereich von $56cd$ bis $267cd$ (Bremslicht) bzw. von $27cd$ bis $150cd$ (Richtungsanzeiger). Jede Intensität wurde pro Situation zehnmal dargeboten.

Im Falle des Bremslichtes wurde das Signal jeweils $1s$ aufgezeigt während der Richtungsanzeiger zunächst $400ms$ aufleuchtete und folgend nach einer $400ms$ Pause erneut $400ms$ angeschaltet wurde.

Insgesamt wurden 39 Probanden befragt, wobei 15 über 40 Jahre alt waren. Das Durchschnittsalter des Kollektivs war 24 Jahre. 12 Personen trugen eine Brille.

Scheer et al. [87] fanden heraus, dass mit zunehmendem Beobachtungsabstand und einer Störlichtquelle in Form des entgegenkommenden Fahrzeuges die Blendung abnimmt. Den optimalen Helligkeitsbereich definieren sie für ein Bremslicht von **63cd** bis **115cd** und von **22cd** bis **59cd** im Falle des Richtungsanzeigers.

3.1.16 Mennig [69] 2018

Mennig [69] analysierte in ihren Untersuchungen, inwiefern eine entfernungsabhängige Helligkeitsanpassung zu einem optimalen Helligkeitsempfinden des Schlusslichtes beitragen könne. Die Untersuchungen fanden in einem **Lichtkanal**⁴ statt.

An der Studie nahmen 25 Personen zwischen 19 und 53 Jahren und einem mittleren Alter von 29,32 Jahren teil. 40% der Probanden wiesen eine korrigierte Sehstärke auf. Zur Bewertung wurden zwei OLED Displays⁵ verwendet.

⁴Die Studien wurden analog zu jenen des Autors im Lichtkanal der AUDI AG in Ingolstadt durchgeführt. Siehe hierzu auch Kapitel 4.1.

⁵Die eingesetzten OLED Displays sind zu jenen des Autors identisch (siehe Kapitel 4.1.1, vgl. Bachmaier [124]).

Es wurden pro Display 9 OLED Kacheln mit jeweils einer Leuchtfläche von $11,51\text{ cm}^2$ so geschaltet, dass sich eine ähnliche Lichtsignatur wie bei einem Audi A4 (Bj. 2015) ergab. Die gesamte Leuchtfläche eines Displays betrug somit **103,6 cm²**. Die beiden Displays wurden in einem Abstand von ca 70 cm zueinander und in einer Höhe von 85 cm aufgestellt.

Die Probanden saßen zur Bewertung in einem Audi Q5. Die Kopfhöhe betrug ca. 130 cm bis 140 cm. Für die Beobachtungsentfernungen von **75 m, 55 m, 35 m** und **15 m** wurden die Probanden um die Beurteilung der optimalen Helligkeit gebeten.

Hierzu wurde das Signal innerhalb von 60 s von $0,3\text{ cd}$ auf $27,1\text{ cd}$ aufgedimmt, bis der Proband das Schlusslicht als „zu hell und unangenehm blendend“ wahrnahm. Daraufhin wurde das Signal im gleichen Lichtstärkebereich abgedimmt, bis der Proband die Helligkeit als „zu dunkel für ein Schlusslicht“ bewertete.

Die Versuche fanden unter zwei unterschiedlichen Umgebungshelligkeiten statt. Unter der ersten Bedingung betrug die Beleuchtungsstärke außerhalb und innerhalb des Fahrzeuges ca. **0,1 lx**. Unter der zweiten Bedingungen ergab sich im Fahrzeug eine Beleuchtungsstärke von ca. **1 lx** und außerhalb des Fahrzeuges von ca. **8,8 lx**.

Mennig [69] analysiert, dass für alle Distanzen Lichtstärken als zu dunkel empfunden werden, die noch unterhalb des gesetzlichen Minimums von 4 cd liegen. Als zu hell wurde das Schlusslicht bereits unterhalb das gesetzlichen Maximums von 17 cd bewertet. Eine Abhängigkeit der Bewertungen vom Beobachtungsabstand konnte Mennig [69] nicht feststellen. Ausschließlich die 15 m Entfernung wies eine durchschnittlich niedrigere Helligkeitsbewertung auf.

3.2 Dynamische Signale

In diesem Kapitel sind die Forschungen zu dynamischen Lichtfunktionen aufgeführt. Als Dynamik wird in diesem Fall die zeitliche Änderung eines Signals aufgefasst. Darunter wird im Folgenden

- *eine Bewegung der Leuchtfläche bzw. räumliche Variation*

- eine Variation der Intensität bzw. Leuchtdichte der Leuchtfläche oder
- eine Kombination aus beiden vorgenannten Szenarien

verstanden.

Mögliche Anwendungsbereiche dynamischer Heckleuchtensignale für die Fahrzeug-Fahrzeug und Fahrzeug-Personen Interaktion werden insbesondere vor dem Hintergrund autonomer Automobile in der Literatur bereits vielfältig diskutiert (vgl. z.B. [9], [23], [55], [123]). Forschungen zur optimalen Helligkeit dynamischer Heckleuchtenfunktionen wurde hingegen bisweilen nur geringe Aufmerksamkeit geschenkt.

3.2.1 Kaltenbach [53] 2009

Kaltenbach [53] stellte in seinen Untersuchungen zur Helligkeit von Heckleuchten fest, dass die optimale Leuchtdichte eines blinkenden Richtungsanzeigers niedriger liegt als jene eines konstant dargebotenen Signals (vgl. hierzu die Zusammenfassung in Kapitel 3.1).

3.2.2 Hamm [45] 2013

Hamm [45] untersuchte die Wahrnehmung eines dynamischen Richtungsanzeigers im Vergleich zum statischen Pendant. In einem ersten realen Aufbau wurde von 54 Testpersonen bewertet, ob sie den dynamischen Richtungsanzeiger eines Audi R8 „besser“, „schlechter“ oder „gleichwertig“ wie einen statischen Richtungsanzeiger erkennen. 77,2% der Probanden gaben hierbei eine verbesserte Wahrnehmung an.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen führte Hamm [45] eine **Laborstudie** zur weiteren Analyse der Wahrnehmung des dynamischen Richtungsanzeigers durch. Die Testperson saß hierzu auf einem Stuhl. Peripher wurden in einem Winkel zwischen 30° und 80° Heckleuchten auf einem Display simuliert. In 0° lag der Fixationspunkt der Testpersonen, welcher mit einer visuellen Aufgabe verknüpft war.

27 Probanden bewerteten zunächst in einem ersten Durchgang, ob der linke oder rechte Richtungsanzeiger aufleuchtet. In einem zweiten Durchgang wurde

dann die Reaktionszeit nach Signalerkennung aufgezeichnet.

Hamm [45] kommt zu dem Ergebnis, dass die Wahrscheinlichkeit, die korrekte Richtung bereits nach dem ersten Blinken zu erkennen, durch den Einsatz eines dynamischen Richtungsanzeigers um 24% steigt. Die Zahl der nicht erkannten Darbietungen konnte gesenkt und die mittlere Reaktionszeit von 1,854 s auf 1,261 s verringert werden.

3.2.3 Skinner und Bullough [96] 2014

Skinner und Bullough [96] untersuchten dynamische Signale hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Reaktionszeit des Fahrers. Hierzu wurde eine **Laboruntersuchung** zur Bewertung unterschiedlicher Richtungsanzeigerfunktionen durchgeführt.

Die Lichtfunktionen wurden auf einem 1 m großem Flachbildschirm präsentiert und konnten mit einer maximalen Leuchtdichte von 40 cd/m^2 dargestellt werden. Die Lichtfunktionen wurden auf dem Bildschirm in zwei Fahrzeuge eingebettet, die im Winkel von 13° bzw. 33° vom Fixationspunkt positioniert und mit einer mittleren Leuchtdichte von 2 cd/m^2 dargestellt waren. Die Umgebungsleuchtdichte betrug in den Versuchen 1 cd/m^2 bzw. 180 cd/m^2 . Die Testpersonen saßen zur Bewertung der Szenarien **1,07 m** vor dem Bildschirm.

Insgesamt nahmen 10 Probanden im Alter von 27 bis 55 Jahren teil. Abwechselnd wurden drei Szenarien dargeboten. Eine „blinkende“, eine „blinkende und hierbei kontinuierlich aufdimmende“ und eine „blinkende und sich von innen nach außen aufbauende“ Funktion. Die Signale blinkten hierbei mit einer Frequenz von $1,5 \text{ Hz}$. Die beiden letztgenannten dynamischen Funktionen benötigten hierbei 120 ms zum Erreichen der maximalen Leuchtdichte bzw. der gesamten Leuchtfläche.

Jedes Signal wurde zur Bewertung jeweils achtmal gezeigt. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, bei Erkennen des rechten oder linken Richtungsanzeigers möglichst schnell die entsprechende Rückmeldetaste auszulösen.

Die längste Reaktionszeit analysieren Skinner und Bullough [96] für die aufdimmende Funktion, während die meisten richtigen Antworten für die sich aufbauende Funktion abgegeben wurden. Die Reaktionszeiten für die blinkende Funk-

tion und jene sich zusätzlich aufbauende Funktion lagen generell unterhalb der Zeiten des Szenarios mit Dimmfunktion.

Für die höhere Umgebungsleuchtdichte von $180\text{cd}/\text{m}^2$ konnten im allgemeinen höhere Reaktionszeiten analysiert werden als für Umgebungen bei $1\text{cd}/\text{m}^2$. Die Reaktionszeiten für das Fahrzeug bei 13° waren niedriger als für das Fahrzeug bei 33° .

3.2.4 Mennig et al. [68] 2016, Mennig [69] 2018

Versuch mit OLED Displays

Ähnlich wie Skinner und Bullough [96] folgert Mennig [69] aus ihren Ergebnissen einer Studie im Audi **Lichtkanal**⁶, dass bei kürzeren Entfernungen und einem fokalen Blickwinkel die Reaktionszeiten verkürzt werden können. Jedoch zeigt sich in jenen Studien kein Einfluss der Umgebungshelligkeit auf die Reaktionszeit. Mennig [69] analysiert zudem, dass mit steigender Animationsgeschwindigkeit die Reaktionsgeschwindigkeit verringert werden kann.

Mennig [69] führte die Untersuchungen mit 42 Personen im Alter von 16 bis 54 Jahren und einem Durchschnittsalter von 31,1 Jahren durch. Mittels zweier OLED Displays⁷ wurde ein Fahrzeugheck simuliert. Es wurde je eine Gesamtleuchtfläche von **103,6cm²** (3x3 OLEDs) verwendet. Die Lichtstärke variierte im Bereich zwischen 4cd und 17cd . Die Probanden saßen zur Bewertung in einem Audi A5, der mittig in einem Abstand von **5m** und **15m** hinter den Displays positioniert wurde.

Als Nebenaufgabe musste der Proband in einem ersten Durchlauf Verkehrsnachrichten lesen, die auf einem Tablet PC in Höhe des Navigationssystems erschienen und in einem zweiten Durchlauf während der Bewertung Verkehrsnachrichten wiederholen, die der Versuchsleiter vorlas.

Insgesamt wurden hierbei zwei unterschiedliche dynamische Funktionen angeboten. Durch die erste Dynamik wurde eine Bewegung von oben nach unten animiert. Hierzu wurden die drei einbezogenen OLED Reihen zeitversetzt angesteuert. Mittels der zweiten Dynamik sollte durch die umlaufende Ansteuerung

⁶vgl. die Ausführungen des Autors in Kapitel 4.1.

⁷siehe Kapitel 4.1.1, vgl. Bachmaier [124]

der äußeren OLEDs die Illusion einer sich drehenden Leuchtfläche entstehen. Die nicht an der Animation beteiligten Segmente waren nach Mennig [69] stets auf Minimalniveau gedimmt.

Studie mit Prototypen Heckleuchte

In einer weiteren Studie untersuchte Mennig [69] (vgl. [68]) die Auswirkungen der teildynamischen Deaktivierung des Bremslichtes auf die Reaktionszeit von Autofahrern. Hierzu verwendete Mennig [69] eine Prototypen Heckleuchte. Die Versuche fanden erneut im Audi **Lichtkanal** statt.

An der Studie nahmen 32 Testpersonen im Alter von 20 bis 52 Jahren und einem Durchschnittsalter von 30,34 Jahren teil. Die Probanden bewerteten die Situation aus einem Fahrzeug. Die Heckleuchte wurde in **2,5m** Entfernung zum Probandenfahrzeug sowie einer Höhe von **0,95m** aufgebaut und in 0° (fokal) und 45° (peripher) bewertet. In einem weiteren Durchlauf wurde die Leuchte halbseitig durch einen Dummy verdeckt.

Zur fokalen Bewertung wurden die Probanden angewiesen, das Bremslicht zu fokussieren. Im Falle der peripheren Bewertungen wurde im Fahrzeug ein Tablet in 0° zur Testperson angeordnet. Hierauf erschienen Verkehrsmeldungen, die als Nebenaufgabe vom Probanden gelesen werden mussten.

Das Bremslicht bestand aus 4 OLEDs. Es wurden zwei verschiedene Signale randomisiert zur Bewertung dargeboten. Bei der statischen Darbietung wurden alle 4 OLEDs gleichzeitig deaktiviert. Bei der teildynamischen Darbietung wurden die 4 Lichtquellen von außen nach innen innerhalb eines Intervalls von **200ms** nacheinander ausgeschaltet. Über einen Taster sollte der Proband jeweils das Ausgehen des Bremslichtes signalisieren.

Mennig [69] stellt unter den getesteten Bedingungen keinen signifikanten Einfluss der Art der Deaktivierung auf die Reaktionszeit fest. Für die fokal dargebotenen Bedingungen analysiert sie geringere Reaktionszeiten als für die peripher dargebotenen Szenarien.

3.2.5 Weitere Forschungsarbeiten

Einen weiteren interessanten Ansatz zur Erforschung der Wahrnehmung dynamischer Signale liefern die Untersuchungen von Chawla et al. [26], [25]. Mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) untersuchten sie die Aktivität des Cortex durch die Darbietung dynamischer Signale.

Punktförmige Signale wanderten während der Studien mit Geschwindigkeiten von $1^\circ/s$, $2^\circ/s$, $4^\circ/s$, $8^\circ/s$, $16^\circ/s$, und $32^\circ/s$ radial nach außen. Hierbei wurden zwei Bedingungen getestet: Bewegung roter Punkte auf grünem Hintergrund und Bewegung roter Punkte auf rotem Hintergrund.

Die Punkte hatten einen Durchmesser von $2,3^\circ$ und die gesamte Darbietungsfläche eine Größe von 37° mit einer Bildwiederholrate von $33,5\text{ Hz}$. Die Probanden wurden während der Bewertungen gebeten das Zentrum der Darbietungsfläche zu fixieren.

Die Bewertungen wurden von 3 rechthändigen Probanden im Alter von 19 bis 22 Jahren durchgeführt.

Analog zur ihren vorherigen Studienergebnissen [26] analysieren Chawla et al. [25] einen nicht linearen Zusammenhang zwischen Signalgeschwindigkeit und Cortexaktivität. Die Beziehung beschreiben sie als „invertierte U“ Abhängigkeit. Je nach Cortexregion ermitteln Chawla et al. [25] die höchste Aktivität bzw. optimale Signalgeschwindigkeit zwischen $4^\circ/s$ und $32^\circ/s$.

3.3 Ableiten eigener Forschungsschwerpunkte

Die Recherchen in der Literatur zeigen eine Vielfalt an unterschiedlichen Untersuchungen zur optimalen Helligkeit von Signalleuchten, sowohl in Laborstudien als auch in Feldstudien. Trotz der großen Anzahl an Experimenten konnten jedoch bisher lediglich unter einigen Untersuchungen tendenziell identische Ergebnisse analysiert werden. So z.B. zum Einfluss der Beobachtungsentfernung (vgl. [11], [80], [89], [90], [114]) und der Signalgröße (vgl. [73], [89]) auf die Wahrnehmung der optimalen Helligkeit. Die Absolutwerte schwanken zwischen den Untersuchungen teilweise erheblich, wie auch Tab. 3.2 als Zusammenfassung ausgewählter Studien zur optimalen Helligkeit von Schlussleuchten verdeutlicht.

Tabelle 3.2: Ausgewählte Studien zur optimalen Helligkeit von Schlussleuchten.

Experimentator(en)	Art des Experimentes	Umgebungsbedingung	Beobachtungsentfernung(en)	Signalgröße(n)	optimale Helligkeit
Cole und Brown [28]	Laboraufbau	$L_U = 2056 \text{ cd/m}^2$	4 m	0,07°; 0,09°; 0,14°; 0,18°; 0,28°	150 cd - 300 cd
Mortimer [73]	Berechnungen nach einer Feldstudie	Tag	/	129 cm ²	372 cd - 2860 cd
Mortimer [73]	Berechnungen nach einer Feldstudie	Nacht	/	129 cm ²	101 cd - 234 cd
Schmidt-Clausen [89]	Feldstudie	Tag	25 m; 100 m	28 cm ² ; 64 cm ² ; 130 cm ²	ca. 36 cd
Schmidt-Clausen [89]	Feldstudie	Nacht	25 m; 100 m	28 cm ² ; 64 cm ² ; 130 cm ²	ca. 12 cd
Schmidt-Clausen [90]	Feldstudie	Nacht	/	20 cm ²	5, 2 cd
Schmidt-Clausen [90]	Feldstudie	Nacht	/	200 cm ²	24, 3 cd
Armbruster [11]	Laboraufbau	$L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$	/	100 cm ²	20 cd/m ²
Armbruster [11]	Laboraufbau	$L_U = 200 \text{ cd/m}^2$	/	100 cm ²	120 cd/m ² - 160 cd/m ²
Armbruster [11]	Feldstudie	Nacht	23 m	Heckleuchte Volvo 850	170 cd/m ² - 400 cd/m ²
Armbruster [11]	Feldstudie	Nacht	35 m	Heckleuchte Volvo 850	240 cd/m ²
Armbruster [10]	Laboraufbau	neblig	23 m	/	550 cd/m ²
Ripperger [83]	Laboraufbau	$L_U = 1,6 \text{ cd/m}^2$	8 m	0,03° - 0,5°	9 cd/m ²
Ripperger [83]	Laboraufbau	$L_U = 2000 \text{ cd/m}^2$	8 m	0,03° - 0,5°	1000 cd/m ²
Ripperger [83]	Laboraufbau	Tag	/	/	50 cd/m ²
Ripperger [83]	Laboraufbau	Nacht	/	/	10000 cd/m ²
Ripperger [83]	Feldstudie	Tag	50 m	100 cm ²	450 cd/m ²
Ripperger [83]	Feldstudie	Nacht	50 m	100 cm ²	7500 cd/m ²
Zandi et al. [114]	Laboraufbau	$L_U = 2,45 \text{ cd/m}^2$	2 m	0,057° - 1,43°	13, 52 cd/m ² - 56, 93 cd/m ²
Polin und Khanh [80]	Feldstudie	Nacht	5 m; 20 m; 50 m; 100 m	Fahrzeugheckleuchte	4 cd

66 Kapitel 3. Bisherige Forschung zu Helligkeit von Heckleuchten

Insbesondere zwischen Laborstudien und Feldstudien treten hierbei große Diskrepanzen auf. Ebenso sind Unterschiede zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Feldstudien festzustellen. Eine mögliche Erklärung für die Differenzen zwischen den Experimenten kann in den voneinander abweichenden Umgebungsbedingungen bzw. möglichen Störeinflüssen während Feldstudien gefunden werden. Zudem kann die Art der Lichtquelle und ihre Homogenität entscheidend zur Bewertung der Helligkeit beitragen (vgl. [11], [101], [102]). Ein weiterer Faktor liegt möglicherweise zusätzlich in der unterschiedlichen Untersuchungsmethodik der Experimentatoren (vgl. [114]).

Für die Untersuchungen dieser Arbeit werden demnach 4 Voraussetzungen für das experimentelle Setup bzw. die Bedingungen während der Untersuchungen berücksichtigt:

- *Schaffung feldstudienähnlicher Bedingungen*
- *Minimierung der äußeren Variablen im Setup und der Störeinflüsse*
- *Einsatz einer homogenen Lichtquelle*
- *Anwendung der identischen Methodik für alle Studien.*

Unter Berücksichtigung der definierten Voraussetzungen soll es im Rahmen dieser Arbeit möglich werden, ein mathematisches Verfahren zur Beschreibung der optimalen Helligkeit eines Schlusslichtes unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren Beobachtungsabstand, Leuchtflächengröße und Leuchtflächengeometrie zu entwickeln.

Aus der Recherche zur Untersuchung dynamischer Signale können keine absoluten Werte zur Beurteilung der optimalen Helligkeit eines dynamischen Schlusslichtes ermittelt werden. Hier findet sich ein weitgehend unbearbeitetes Forschungsfeld. Insbesondere bleibt die Frage der Helligkeitswahrnehmung im Vergleich zu einem statischen Schlusslicht offen. Die zuvor definierten Voraussetzungen, insbesondere die Anwendung der identischen Methodik während der dynamischen Studien, sollen im Rahmen dieser Arbeit einen Vergleich zwischen der Wahrnehmung der optimalen Helligkeit eines dynamischen Schlusslichtes und eines statischen Schlusslichtes ermöglichen.

Die Untersuchungen dieser Arbeit zur optimalen Helligkeit von Schlussleuchten können daher im Wesentlichen durch folgende Forschungsfragen konkretisiert werden:

1. *Wie beeinflusst der Beobachtungsabstand zur Heckleuchte die optimale Helligkeit eines Schlusslichtes?*
2. *Wie beeinflusst die Leuchtflächengröße die optimale Helligkeit eines Schlusslichtes?*
3. *Wie beeinflusst die Leuchtflächengeometrie die optimale Helligkeit eines Schlusslichtes?*
4. *Wie ändert sich die optimale Helligkeit eines dynamischen Schlusslichtes im Vergleich zu einem Statischen?*

Zur Definition der Forschungshypothesen anhand der Forschungsfragen können die Ergebnisse des Literaturstudiums dienen.

Insbesondere die Arbeiten von Armbruster [11], Polin und Khanh [80], Schmidt-Clausen [89], [90] und Zandi et al. [114] lassen folgende Hypothese zur 1. Frage zu:

1. *Die als optimal wahrgenommene Helligkeit für ein Schlusslicht steigt mit dem Beobachtungsabstand zur Heckleuchte.*

Die Untersuchungen lassen zudem die Vermutung zu, dass in der Hypothese die allgemeine Größe „Helligkeit“ durch die photometrische Größe Leuchtdichte ersetzt werden darf.

Wenn auch die Untersuchungen von Cole und Brown [28] keinen Einfluss der Signalgröße auf die optimale Leuchtdichte eines Signales nachweisen konnten, so lässt sich auf Grundlage der Ergebnisse von Mortimer [73] und Schmidt-Clausen [89] aus Forschungsfrage 2 folgende Hypothese formulieren:

2. *Mit steigender Leuchtfläche nimmt die als optimal wahrgenommene Leuchtdichte für ein Schlusslicht ab.*

Die Ergebnisse von Schmidt-Clausen [90] zeigen jedoch, dass die als optimal empfundene Lichtstärke mit steigender Leuchtfläche anwächst.

Die 3. Forschungsfrage kann in folgende Hypothese überführt werden:

68 Kapitel 3. Bisherige Forschung zu Helligkeit von Heckleuchten

3. Die Leuchtflächengeometrie beeinflusst die Wahrnehmung der optimalen Helligkeit eines Schlusslichtes.

Auf Grundlage der Ergebnisse aus der Literatur kann zunächst nur eine allgemeine 3. Hypothese formuliert werden. Den Einfluss der Geometrie auf die Wahrnehmung der optimalen Helligkeit belegen jedoch Untersuchungen zum Einfluss der Flächengröße (siehe 2. Hypothese) sowie die Arbeiten zum Einfluss der Geometrie auf die Wahrnehmung der Signalhelligkeit von Zandi et al. [114]. Kritisch sei jedoch angemerkt, dass Studien von Polin und Khanh [80] keinen Einfluss der Heckleuchtengeometrie auf die Helligkeitswahrnehmung belegen konnten.

In den Untersuchungen von Hamm [45], Mennig [69] sowie Skinner und Bullough [96] konnte eine Abnahme der Reaktionszeit bei dynamischen Signalen festgestellt werden. Insbesondere die Ergebnisse von Kaltenbach [53] zum Vergleich blinkender und statisch dargebotener Richtungsanzeiger lassen bei dynamischen Funktionen den Schluss einer niedrigeren als optimal empfundenen Helligkeit als bei Statischen zu. Zudem zeigen die Ergebnisse von Chawla et al. [26], [25] einen nicht linearen Zusammenhang der Signalgeschwindigkeit und der Cortexaktivität auf, was zur Ausformulierung folgender 4. Hypothese führt:

4. Die optimale Helligkeit eines dynamischen Schlusslichtes liegt unterhalb jener eines Statischen. Die Abhängigkeit zwischen Signalgeschwindigkeit und optimaler Helligkeit ist hierbei nicht linear.

4 Untersuchungen zur optimalen Helligkeit

Dieses Kapitel befasst sich mit der Untersuchung der optimalen Helligkeit von homogenen Schlussleuchten nach den in Kapitel 3.3 aufgestellten Forschungshypothesen. Ausgehend von jenen Hypothesen wird zunächst das experimentelle Setup erörtert und lichttechnisch charakterisiert sowie die Versuchsmethodik beschrieben. Dieser Betrachtung schließt sich eine Beurteilung möglicher Fehlerquellen im Versuchsdesign an. Folgend werden ausführlich die statistischen Verfahren zur Auswertung der Studiendaten eingeführt und die so analysierten Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Schließlich werden die Resultate unter Einbezug der Literatur final diskutiert.

4.1 Experimenteller Aufbau

Die Studien wurden in einem befahrbaren Lichtkanal¹ durchgeführt. Die Wände des Lichtkanals sind mattschwarz gestrichen, wobei die Reflektionscharakteristik des Bodenbelages als straßenähnlich angenommen werden kann. Der Untersuchungsraum setzt sich aus zwei Abschnitten zusammen. Der erste Abschnitt ist 18 m breit, 9 m hoch und 25 m lang. Der zweite Abschnitt besitzt eine Länge von 95 m bei einer Breite von 12 m und einer Höhe von 5 m. Es können somit auf einer Gesamtlänge von 120 m Untersuchungen unter reproduzierbaren Bedingungen und im Besonderen Lichtverhältnissen ohne Störeinflüsse erfolgen. Dies ist bei Freifeldversuchen ein nicht zu vernachlässigender Faktor und muss dort als

¹Für die Studien wurde das Lichtassistenzzentrum der AUDI AG in Ingolstadt genutzt.

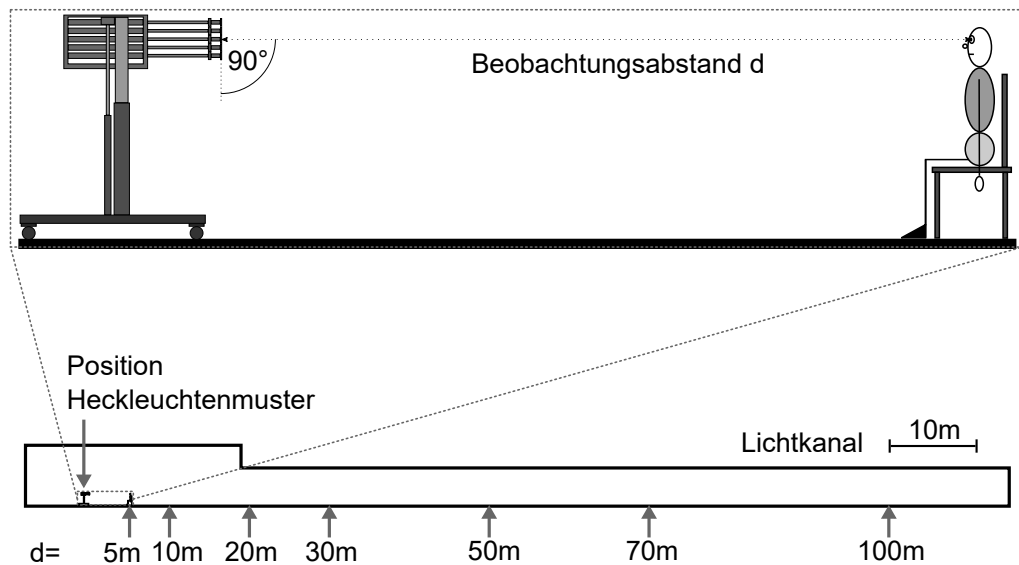


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus. Zur Orientierung sind ebenfalls die während der Untersuchungen eingestellten Beobachtungsabstände d (vgl. Kapitel 4.2) eingezeichnet. Nach einer vorherigen Publikation des Autors [122].

Unsicherheit mit bedacht werden.

Während der Untersuchungen wurde das Heckleuchtenmuster im ersten Abschnitt des Lichtkanals positioniert und die Probanden zur Bewertung der optimalen Helligkeit auf einem Stuhl vor dem Muster platziert. Hierbei wurde auf eine aufrechte Oberkörper- und Kopfhaltung geachtet. Der Mittelpunkt der jeweils zu bewertenden Leuchtfläche wurde für jeden Probanden auf Augenhöhe eingestellt. Der komplette experimentelle Aufbau inklusive Heckleuchtenmuster (siehe Kapitel 4.1.1) und eingestellter Beobachtungsabstände (vgl. Kapitel 4.2) ist in Abb. 4.1 schematisch dargestellt.

4.1.1 Charakterisierung des Heckleuchtenmusters

Das Heckleuchtenmuster besteht aus 13×5 OLEDs mit jeweils einer Größe von $4,74 \text{ cm} \times 4,37 \text{ cm}$. Die Leuchtfläche pro OLED ist nahezu quadratisch und beträgt $3,8 \text{ cm} \cdot 3,03 \text{ cm} = 11,514 \text{ cm}^2$. Die OLEDs des Musters können unabhängig voneinander angesteuert werden. Es handelt sich somit um ein quasi monochro-



Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des OLED Heckleuchtenmusters [118], [117].

mes, rotes OLED Display² mit 13x5 Pixeln. In Abb. 4.2 ist das Model schematisch dargestellt.

Das Dimmverhalten des Displays ist der menschlichen Wahrnehmung angepasst. Hierzu wurde eine Gamma Korrektur mit dem Faktor 2,2 gewählt (vgl. [3]). Die Dimmung ist mit $14\text{Bit} = 16384\text{Schritten}$ realisiert, wobei die PWM Frequenz bei 120Hz liegt (vgl. [3]). Die eingesetzten Konstantstromtreiber werden über eine DMX-Schnittstelle mithilfe der Software *e:cue Programmer V7.0 Lighting Application Suite* angesteuert.

Abb. 4.3 zeigt die ermittelte mittlere Leuchtdichte L einer OLED bzw. des Displays in Abhängigkeit der eingestellten Dimmstufe B . Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 > 0,99$ kann L durch folgende Beziehung in einem Bereich von $B = 12\%$ bis $B = 72\%$ beschrieben werden:

$$L(B) = 0,973 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \cdot B^2 - 10,144 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \cdot B + 27,679 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}. \quad (4.1)$$

Aufschluss über die Homogenität der OLEDs in Abhängigkeit der Dimmstufe liefert Abb. 4.4. Dargestellt sind die Aufnahmen für die Dimmstufen 42%, 56% und 70%. Mit erhöhter Dimmstufe sinkt die Homogenität der OLEDs. Die Leuchtdichte fällt hierbei von der Mitte zu den Rändern hin ab. Weitere Details zum Heckleuchtenmuster können der vom Autor betreuten Arbeit von Bachmaier

²Das Display wurde von der Firma *SP3 Schurer Projekte Prototypen Produkte GmbH* mitentwickelt und aufgebaut.

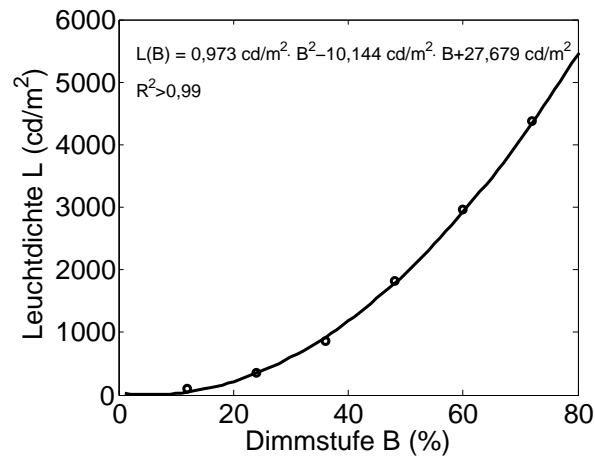


Abbildung 4.3: Abhängigkeit der OLED Leuchtdichte L von der Dimmstufe B . Die Messpunkte sind mit einem Polynom zweiten Grades angefitet.

[124] entnommen werden.

4.1.2 Lichttechnische Vermessung des Untersuchungsraumes

Zur weiteren Charakterisierung des experimentellen Aufbaus werden die lichttechnischen Einflüsse des Untersuchungsraums berücksichtigt. Da die Untersuchungen bei völlig abgedunkelten Bedingungen stattfanden, wird die Umgebung

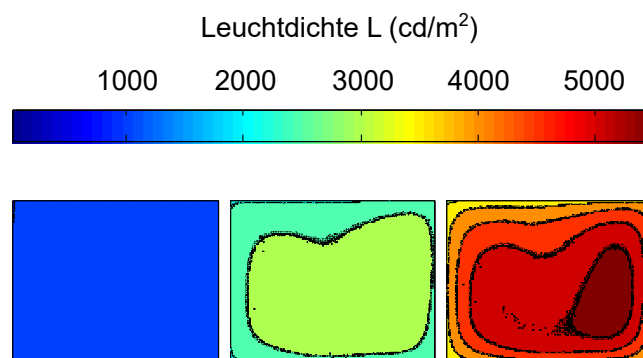


Abbildung 4.4: Vergleich der OLED Leuchtdichteverteilungen für die Dimmstufen 42%, 56% und 70%. Die Homogenität sinkt mit steigender Dimmstufe bzw. mittlerer Leuchtdichte L . Die Leuchtdichte nimmt zum Rand der Leuchtfläche hin ab.

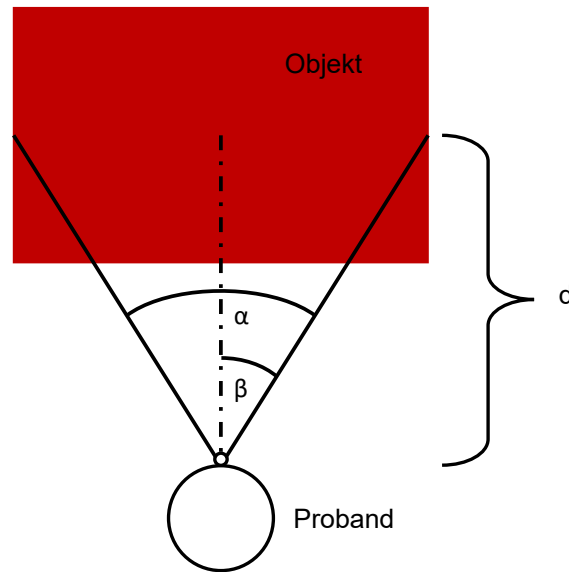


Abbildung 4.5: Grafische Erklärung zu Beobachtungswinkel β und Sehwinkel α . Das hier beispielhaft beobachtete Objekt bzw. der beobachtete Bereich ist rot eingezeichnet.

des Heckleuchtenmusters nur durch jenes selbst lichttechnisch beeinflusst. Abb. 4.6 zeigt eine Leuchtdichteaufnahme des Displays und näherer Umgebung für die in den Untersuchungen größte verwendete Leuchtfläche von $A = 184,2 \text{ cm}^2$ am Beispiel der nächsten Beobachtungsentfernung d von 5 m und der maximal eingestellten Dimmstufe von $B = 70\%$. Zur Orientierung ist der Beobachtungswinkel β (vgl. Abb. 4.5) für den Abstand $d = 5 \text{ m}$ aufgetragen. Die OLED Leuchtdichte liegt in der Messung zwischen 10^3 und 10^4 cd/m^2 . Das Umfeld lässt sich in 3 Bereiche unterteilen. Im Bereich 1 (cyan) in unmittelbarer Nähe zu der OLED Leuchtfläche fällt die Umfeldleuchtdichte L_U bis auf 10 cd/m^2 , im Bereich 2 (hellblau) bis auf 1 cd/m^2 und im Bereich 3 (dunkelblau) bis auf $0,1 \text{ cd/m}^2$ ab. Dieses Verhalten verdeutlicht der in Abb. 4.6 (schwarz) angedeutete und in Abb. 4.7 dargestellte Leuchtdichteschnitt: Außerhalb der OLED Leuchtfläche fällt die Leuchtdichte rapide ab.

Für einen Beobachtungsabstand von $d = 5 \text{ m}$ liegt die Umfeldleuchtdichte L_U für einen Beobachtungswinkel $|\beta| > 1,16^\circ$ unterhalb von 10 cd/m^2 . Ab $|\beta| > 2,59^\circ$ sinkt L_U unterhalb von 10^0 cd/m^2 bevor sie für $|\beta| > 5,83^\circ$ unter Werte von 10^{-1} cd/m^2 fällt. Der doppelte Beobachtungswinkel kann als Sehwinkel α

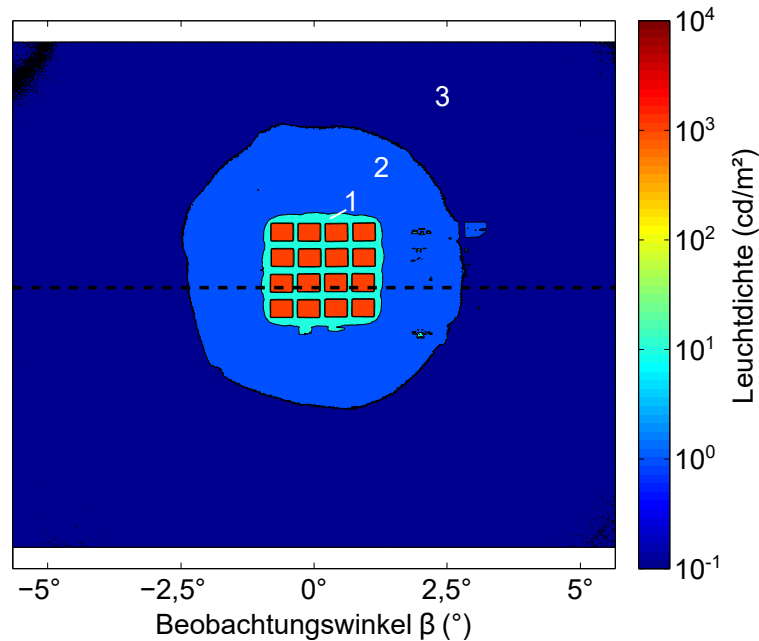


Abbildung 4.6: Leuchtdichteverteilung einschließlich Umgebungsleuchtdichte L_U für die größte Leuchtflächengröße $A = 184,2 \text{ cm}^2$ bei einer Beobachtungsentfernung von $d = 5 \text{ m}$ und maximaler Dimmstufe ($B=70\%$). Die Leuchtdichte L der OLEDs liegt zwischen 10^3 und 10^4 cd/m^2 . Die Umfeldleuchtdichte L_U liegt innerhalb des Umfeldbereiches 1 (cyan) in der Größenordnung von 10 cd/m^2 . Innerhalb von Zone 2 fällt L_U auf 1 cd/m^2 und in Zone 3 auf $0,1 \text{ cd/m}^2$ ab. Dies entspricht insgesamt einem Sehwinkel von $\alpha = 11,66^\circ$. Zusätzlich ist der Leuchtdichteschnitt (schwarz) zur weiteren Analyse (siehe Abb. 4.7) markiert.

interpretiert werden (vgl. Abb. 4.5). Für $\alpha > 11,66^\circ$ liegt die Umfeldleuchtdichte L_U an den Randbereichen für die nächste Untersuchungsdistanz ($d = 5 \text{ m}$) daher unterhalb von 10^{-1} cd/m^2 . Bei einer Beobachtungsentfernung von 100 m reduziert sich dieser Sehwinkel auf $0,58^\circ$. In Tab. 4.1 sind die berechneten Beobachtungswinkel für den Übergang zwischen den definierten Umfeldleuchtdichtebereichen 1, 2 und 3 für alle untersuchten Beobachtungsabstände d zusammengefasst.

Das Verhalten der Umfeldleuchtdichte L_U während der Versuche kann analog zum Verhalten der Leuchtdichte L nach Gl. (4.1) angenommen werden. Dies bedeutet, dass die dargestellten L_U Werte mit $B = 70\%$ auch die Maximalwerte im Experiment widerspiegeln.

Anhand der Umfeldleuchtdichten ist somit nach DIN 5031-3 [31] von mesopi-

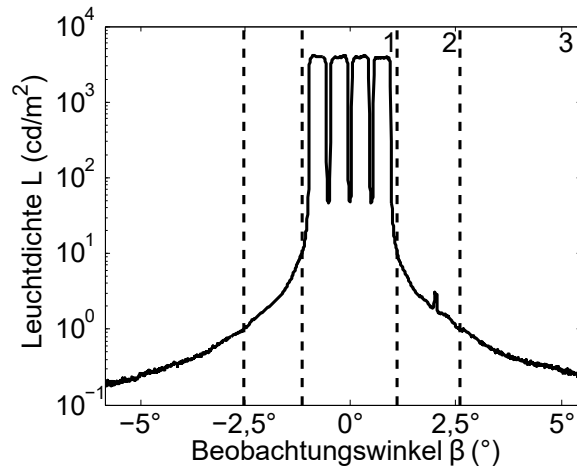


Abbildung 4.7: Leuchtdichteschnitt nach Abb. 4.6. Zusätzlich sind die einzelnen Umfeldbereiche 1-3 gekennzeichnet. Eine Analyse der Umfeldleuchtdichtewerte für die einzelnen Bereiche ist in Form von Tab. 4.1 zusammengestellt.

d (m)	Umfeldleuchtdichte L_U (cd/m^2)		
	$< 10^1$	$< 10^0$	$< 10^{-1}$
5	$|\beta| > 1,16^\circ$	$|\beta| > 2,59^\circ$	$|\beta| > 5,83^\circ$
10	$|\beta| > 0,58^\circ$	$|\beta| > 1,30^\circ$	$|\beta| > 2,92^\circ$
20	$|\beta| > 0,29^\circ$	$|\beta| > 0,65^\circ$	$|\beta| > 1,46^\circ$
30	$|\beta| > 0,19^\circ$	$|\beta| > 0,43^\circ$	$|\beta| > 0,97^\circ$
50	$|\beta| > 0,12^\circ$	$|\beta| > 0,26^\circ$	$|\beta| > 0,59^\circ$
70	$|\beta| > 0,08^\circ$	$|\beta| > 0,19^\circ$	$|\beta| > 0,42^\circ$
100	$|\beta| > 0,06^\circ$	$|\beta| > 0,13^\circ$	$|\beta| > 0,29^\circ$

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Analyse der Umfeldleuchtdichte L_U auf Grundlage des Leuchtdichteschnitts nach Abb. 4.7. Es sind für alle Beobachtungsabstände die Beiträge des Beobachtungswinkel $|\beta|$ angegeben, innerhalb welcher die entsprechenden Umfeldleuchtdichten L_U vorliegen. $2 \cdot |\beta|$ kann als Sehwinkel α verstanden werden.

schen Bedingungen auszugehen, welche hierfür einen Bereich von $10^2 \frac{cd}{m^2} > L_U > 10^{-5} \frac{cd}{m^2}$ definiert. Die im dargestellten Beispiel ermittelte Leuchtdichte der OLED Leuchtf lächen liegt jedoch deutlich höher als die Umfeldleuchtdichten. Köth [58] weist in diesem Fall darauf hin, dass die Eigenschaften des menschlichen Auges im photopischen Bereich zu betrachten seien.

4.2 Versuchsmethodik und Ablauf³

Vor Beginn der Befragung wurde jede Testperson gebeten zunächst 10 Minuten unter komplett abgedunkelten Bedingungen zu verweilen, um eine Adaption an mesopische Bedingungen zu gewährleisten (vgl. Gramberg-Danielsen [41]). Zur Bewertung wurde die Leuchte von $L = 4085 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ ($B = 70\%$) abgedimmt bis der Proband das Erreichen der optimalen Helligkeit eines Schlusslichtes signalisierte. Anschließend wurde die Leuchtdichte ausgehend von $L = 1,3 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ ($B = 5\%$) kontinuierlich erhöht und erneut der Wert ermittelt, bei welchem die Testperson das Erreichen der optimalen Schlusslichthelligkeit anzeigte. Pro Proband wurden somit für jede Bedingung zwei als optimal gewertete Helligkeitsstufen B_1 und B_2 aufgezeichnet. Ein kompletter Dimmvorgang hatte eine theoretische Gesamtdauer von 45 s. Ein kompletter Durchgang dauerte pro Proband inklusive Einweisung und Untersuchung ca. 50 - 60 Minuten. Die verwendete Methodik ähnelt dem Herstellungsverfahren und ist unter anderem vergleichbar mit den Vorgehensweisen von Mortimer [73], Ripperger [83], [84] sowie Mennig [69].

4.2.1 Untersuchung 1: Variation der Leuchtflächengröße A

Zur Untersuchung des Einflusses der Leuchtflächengröße auf die optimale Helligkeit von Schlussleuchten wurde eine nahezu rechteckige Leuchtflächengeometrie von 2x2, 3x3 und 4x4 benachbarten OLEDs gewählt. So entstehen, bis auf die nicht leuchtenden Ränder der OLEDs, zusammenhängende Leuchtflächen von insgesamt $A_{2 \times 2} = 46,1 \text{ cm}^2$, $A_{3 \times 3} = 103,6 \text{ cm}^2$ und $A_{4 \times 4} = 184,2 \text{ cm}^2$ (Abb. 4.8). Die Wahl der Flächengrößen orientierte sich hierbei an den eigenen Analysen zu Schlussleuchten (siehe Abb. 2.3) sowie der Literaturrecherche (Kapitel 3). Die Untersuchung wurde mit der kleinsten Fläche $A_{2 \times 2} = 46,1 \text{ cm}^2$ bei Beobachtungsabständen von $d = 5 \text{ m}$ und folgend $d = 10 \text{ m}$, $d = 20 \text{ m}$, $d = 30 \text{ m}$, $d = 50 \text{ m}$, $d = 70 \text{ m}$ und $d = 100 \text{ m}$ begonnen und mit den Flächengrößen $A_{3 \times 3} = 103,6 \text{ cm}^2$

³Die Untersuchungen fallen in den Zeitraum der vom Autor betreuten Arbeiten von Kunick [126], Ollig [128] und Patzig [129]. Teile der Rohdaten aus Untersuchung 1 (Kapitel 4.2.1) wurden von Kunick [126] in seinem Praxissemesterbericht weiter verarbeitet. Teile der aus Untersuchung 1 (Kapitel 4.2.1) und Untersuchung 2 (Kapitel 4.2.2) gewonnenen Rohdaten bilden die Grundlage der Arbeit von Ollig [128].

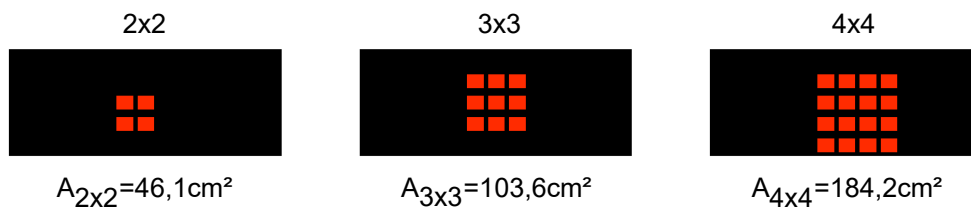


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung der in Untersuchung 1 (Variation der Leuchtflächengröße) gewählten Leuchtflächen. Von links nach rechts ist zunächst die Geometrie mit 2x2, 3x3 und 4x4 OLEDs dargestellt. Die Leuchtflächengröße variiert von $A_{2 \times 2} = 46,1 \text{ cm}^2$ auf $A_{3 \times 3} = 103,6 \text{ cm}^2$ und $A_{4 \times 4} = 184,2 \text{ cm}^2$ [118], [117].

und $A_{4 \times 4} = 184,2 \text{ cm}^2$ wiederholt.

4.2.2 Untersuchung 2: Variation der Leuchtflächengeometrie

Zur Untersuchung des Einflusses der Leuchtflächengeometrie auf die optimale Helligkeit von Schlussleuchten wurde eine Geometrie aus drei Streifen und eine linienförmige Geometrie gewählt (Abb. 4.9). Die Geometrien entsprechen somit zum einen dem Trend mehrteiliger Schlussleuchten sowie zum anderen durchgängiger Heck- bzw. Schlussleuchten, wie sie aktuell beispielsweise von Audi oder Porsche eingesetzt werden. Im Falle mehrteiliger Schlussleuchten besteht nach Literaturrecherche (Kapitel 3) zudem ein weitestgehend unbearbeitetes Feld.

Jeder der drei Streifen bestand aus drei OLEDs. Der Abstand zwischen den Streifen betrug zwei OLEDs (zwei Pixel). Für die linienförmige Geometrie wurden 13 horizontal verlaufende OLEDs angesteuert. Um jedoch eine vergleichbare Flächengröße von $A_{3 \times 3} = A_{\text{Streifen}} = A_{\text{Linie}} = 103,6 \text{ cm}^2$ zu erhalten, wurden ca. 31% des oberen Bereiches jeder OLED Leuchtfläche abgeschattet (Abb. 4.9). Zu Beginn der Versuchsreihe wurde die Geometrie aus drei Streifen bei Beobachtungsabständen von $d = 5 \text{ m}$, $d = 10 \text{ m}$, $d = 20 \text{ m}$ und $d = 70 \text{ m}$ dargeboten. Anschließend wurde das Vorgehen für die linienförmige Geometrie wiederholt.

4.2.3 Untersuchung 3: Dynamische Signale

Zur Untersuchung des Einflusses von dynamischen Signalen auf die optimale Helligkeit von Schlussleuchten wurde erneut die Geometrie aus 3x3 OLEDs (siehe

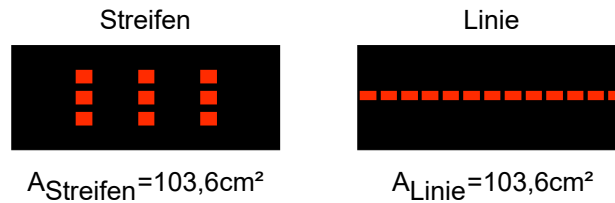


Abbildung 4.9: Grafische Veranschaulichung der in Untersuchung 2 (Variation der Leuchtflächengeometrie) gewählten Leuchtflächengeometrien „Streifen“ und „Linie“. Die Leuchtflächen­größe beträgt jeweils $A_{\text{Streifen}} = A_{\text{Linie}} = 103,6 \text{ cm}^2$ [118], [117].

Kapitel 4.2.1) und einer Flächen­größe von $A_{3 \times 3} = 103,6 \text{ cm}^2$ gewählt. Bei gleichbleibender Versuchsdurchführung lief nun die dargebotene Leuchtfläche abwechselnd von einer zur anderen Seite des OLED Displays (Abb. 4.10). Hierbei blieb die Leuchtflächen­größe stets konstant. Die Bewertung durch die Probanden wurde bei einem Beobachtungsabstand von $d = 5 \text{ m}$ (vgl. Abb. 4.1) und einer Durchlauf­dauer t (Lauf des Signales von links nach rechts und wieder zurück nach links) von $1,2 \text{ s}$ gestartet. Im Folgenden wurde t auf $0,9 \text{ s}$, $0,6 \text{ s}$ und $0,3 \text{ s}$ abgesenkt (vgl. Hamm [45]). Dieses Vorgehen wurde für die Entfernungen von $d = 20 \text{ m}$ und $d = 70 \text{ m}$ (vgl. Abb. 4.1) wiederholt.

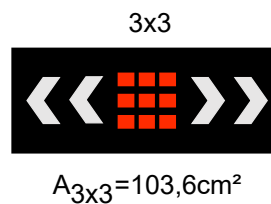


Abbildung 4.10: Grafische Darstellung des innerhalb Untersuchung 3 (Dynamische Signale) verwendeten Signals. Die Grundlage bildet die Leuchtfläche aus 3×3 OLEDs aus Untersuchung 1 mit $A_{3 \times 3} = 103,6 \text{ cm}^2$. Das Signal läuft während der Versuchsreihe auf dem Display kontinuierlich von einer zur anderen Seite. Die Durchlauf­dauer t wird zwischen $1,2 \text{ s}$, $0,9 \text{ s}$, $0,6 \text{ s}$ und $0,3 \text{ s}$ variiert. Ergänz­te, bereits durch den Autor publizierte Darstellung [118], [117].

4.3 Probanden

Um Einflüsse von Alterungsprozessen des Auges wie z.B. die Linsen- und Glaskörpertrübung auf die physiologischen Prozesse innerhalb des Sehapparates zu minimieren (vgl. [8]), wurde das Alter der zur Untersuchung beitragenden Probanden auf Mitte dreißig begrenzt. Dies ist im Besonderen im Hinblick auf die Modellbildung in Kapitel 4.6.2 wesentlich. Die Farbnormalsichtigkeit der Probanden wurde mit einem Ishihara-Test aus 38 Tafeln [48] überprüft. Keiner der Teilnehmer zeigte hierbei eine Farbsehschwäche.

29 Probanden im Alter zwischen 20 und 36 Jahren und einem Durchschnittsalter von 26,66 Jahren wurden innerhalb von Untersuchung 1 berücksichtigt. Die Stichprobe wies hierbei eine Standardabweichung von $s = 4,28a$ auf. Unter den 8 weiblichen und 21 männlichen Personen waren 10 bereits zuvor mit Lichttechnik vertraut. 6 Probanden im Kollektiv waren kurzsichtig, wobei die Sehschwäche während der Versuche mit einer Brille korrigiert wurde.

Für Untersuchung 2 wurden 6 weibliche, 21 männliche und somit 27 Probanden im Alter von 21 bis 34 Jahren einbezogen. Das Durchschnittsalter lag bei 25,96 Jahren ($s = 3,81a$). 10 Personen waren bereits zuvor mit Lichttechnik vertraut. Unter den Probanden befanden sich 6 kurzsichtige Teilnehmer, die ihre Sehschwäche mit einer Brille korrigierten. 7 Probanden des Kollektivs nahmen bereits ebenfalls an Versuch 1 teil.

Für Untersuchung 3 wurde auf das identische Probandenkollektiv wie für Untersuchung 2 zurückgegriffen.

4.4 Mögliche Fehlerquellen im Versuchsdesign

Nach Funke [38] können die Ergebnisse der Untersuchungen durch folgende Unsicherheiten beeinflusst werden:

- *Unsicherheiten der Bewertungsskala*
- *Unsicherheiten durch technisch bedingte Abweichungen von den Zielparametern*
- *Unsicherheiten durch Gegebenheiten während der Probandentests*

- *Messunsicherheiten durch die verwendeten lichttechnischen Messgeräte*
- *Messunsicherheiten durch die verwendeten geometrischen Messmittel.*

Jene genannten möglichen Fehlerquellen werden im folgenden für das verwendete Versuchsdesign diskutiert.

4.4.1 Bewertungsskala

Für die Untersuchungen wurde mit einer kontinuierlichen Bewertungsskala gearbeitet. Für jeden Probanden lagen jeweils zwei als optimal gewertete Helligkeitsstufen vor (vgl. Kapitel 4.2). Zum einen wurde zur Weiterverarbeitung der Daten und statistischen Beurteilung mittels ANOVA ein Durchschnittswert aus den beiden ermittelten Werten (vgl. z.B. [69], [88]) berechnet. Zum anderen werden die beiden ermittelten Werte für jeden Probanden als Minimum und Maximum Wert eines Intervalles der optimalen Helligkeit interpretiert (siehe Beginn Kapitel 4.5). Somit geht die Information der Distanz der beiden bewerteten Helligkeitsstufen nicht verloren bzw. es kann eine Aussage über die Intervallgröße getroffen werden. Die Intervalle der Probanden werden letztlich zu Häufigkeitsverteilungen für jede untersuchte Bedingung kumuliert. Durch Interpolationsverfahren können die Untersuchungsergebnisse unter Minimierung des Informationsverlustes durch das Bewertungsverfahren bzw. die Bewertungsskala weiterverarbeitet und analysiert werden. Durch das Vorgehen kann so auf Verfahren zur Reduzierung der interpersonellen Streuung verzichtet werden (vgl. [38]).

4.4.2 Technisch bedingte Abweichungen

Unsicherheiten durch technisch bedingte Abweichungen von den Zielparametern werden im gewählten Versuchsdesign insbesondere durch das Heckleuchtenmuster verursacht. Folgende Effekte sind zur Gewährleistung reproduzierbarer Bedingungen während der Untersuchungen zu berücksichtigen:

- *Alterung der OLEDs während der Untersuchungen*
- *thermische Einflüsse auf das OLED Emissionsverhalten*

- *Winkelabhängigkeit der lichttechnischen Größen*
- *Abhängigkeit des Farbortes von der Ansteuerung bzw. Dimmstufe B*
- *Differenz zwischen softwareseitigen Sollwerten und resultierenden Istwerten.*

Zur Analyse der OLED Alterung wurden die mittleren Leuchtdichten einer genutzten und ungenutzten OLED verglichen. Bei $B = 70\%$ (vgl. Gl. (4.1)) wurde eine um 1,7% verminderte mittlere Leuchtdichte der genutzten OLED festgestellt. Die Farbortdifferenz $\Delta_{u'v'}$ betrug 0,001 wobei die Farbkoordinaten der ungenutzten OLED bei $u' = 0,525$, $v' = 0,521$ lagen.

Zur Bewertung des Einflusses thermischer Effekte auf die Abstrahlcharakteristik wurde die maximale in den Untersuchungen verwendete Dimmstufe $B = 70\%$ eingestellt und die mittlere Leuchtdichte unmittelbar nach dem Einschaltvorgang der OLED vermessen und in einer zweiten Messung im thermischen Gleichgewicht. Die mittlere Leuchtdichte im thermischen Gleichgewicht liegt um ca. 2,3% niedriger.

Da sich der Sehwinkel innerhalb der Untersuchungen mit dem Abstand zum Heckleuchtenmuster ändert, wurde die Abhängigkeit der Leuchtdichte vom Beobachtungswinkel untersucht. Der maximale Sehwinkel tritt für das gewählte Versuchsdesign bei einem Beobachtungsabstand von 5 m und Untersuchung 2 (Kapitel 4.2.2) bzw. Untersuchung 3 (Kapitel 4.2.3) auf. Hier wird jeweils für die linienförmige Geometrie und das dynamische Signal die komplette Displaybreite von 60,68 cm (die äußeren Ränder werden subtrahiert) genutzt. Dies führt zu einem Sehwinkel α von ca. 7° bzw. einem Beobachtungswinkel β von ca. $3,5^\circ$. Die Abstrahlcharakteristik der verwendeten OLEDs ist um den Beobachtungswinkel von 0° ⁴ nahezu symmetrisch. Innerhalb eines Beobachtungswinkels von $\beta = 3,5^\circ$ fällt die Leuchtdichte um 1,2% ab. Die Farbkoordinaten driften um $\Delta_{u'v'} = 0,002$. Im Unterschied zu den beiden vorher angeführten Abweichungen handelt es sich hierbei um einen systematischen Fehler. Es ist also davon auszugehen, dass die Datensätze aller Probanden die selben Abweichungen aufweisen.

Wie aufgrund des PWM Signales zu erwarten ist, konnten keine Veränderun-

⁴Dies entspricht einer senkrechten Sicht auf das Display, wie in allen Versuchen angestrebt.

gen des Farbbortes bei einer Variation der Ansteuerung bzw. der Dimmstufe B festgestellt werden. Sie unterschreiten die Messgenauigkeit.

Durch die Bestimmung einer Leuchtdichtefunktion in Abhängigkeit der Ansteuerung in Form von Gl. (4.1) konnte mittels lichttechnischer Messungen jedem Ansteuerungssollwert ein lichttechnischer Istwert zugeordnet werden. Mehrmalige Kontrollen zwischen den einzelnen Untersuchungen lassen den Schluss eines konstanten Verhältnisses zwischen gemessenem und eingestelltem Wert zu. Die Reproduzierbarkeit wird auch durch die Ergebnisse von Bachmaier [124] bestätigt.

4.4.3 Gegebenheiten während der Probandentests

Die Bedingungen während der Untersuchungen konnten weitestgehend konstant gehalten und reproduzierbar eingestellt werden. So wurde der Lichtkanal durch die Lüftungsanlage gleichbleibend auf Zimmertemperatur klimatisiert. Die Einstellung der Augenposition der Probanden erfolgte direkt vor dem Heckleuchtenmuster. Durch die Möglichkeit der Höheneinstellung des Musters konnten so Größenunterschiede der Probanden ausgeglichen werden. Da die Untersuchungen unter völlig abgedunkelten Bedingungen stattfanden, sind nicht reproduzierbare Störeinflüsse wie bei Freifeldversuchen (Sterne, Mond, Nebel, Lärm etc.) ausgeschlossen. Die zu bewertende Leuchtfläche dient gleichzeitig als Fixationspunkt. Die Dauer der Probandentest wurde auf unter 60 *min* reduziert, um Transfereffekte wie z.B. Ermüdung, Lerneffekte und Motivationsverlust [19] zu minimieren.

4.4.4 Lichttechnische Messgeräte

Zur Bestimmung der photometrischen und kolorimetrischen Eigenschaften des Heckleuchtenmusters wurden mit Hilfe des mobilen Lichtmessgerätes BTS256-E der Firma Gigahertz-Optik zunächst die spektrale Bestrahlungsstärke gemessen und im weiteren Verlauf mithilfe der Datenbank des Colour & Vision Research Laboratory [5] die photometrischen und kolorimetrischen Größen bestimmt. Der spektrale Detektor des BTS256-E weist hierbei in einem Bereich von 400 *nm* – 750 *nm* eine Kalibrierunsicherheit von $\pm 4\%$ auf [6]. Im Falle der Leuchtdichtekamera LMK-98-4 color der Firma TechnoTeam ist für die Normlichtart A eine

Messgenauigkeiten von $\Delta L < 3\%$ angegeben, wobei die spektrale Anpassungskennzahl $f'_1 < 3,5\%$ beträgt [7]. Die Abweichungen für tiefrotes Licht, wie im Falle des Heckleuchtenmusters, können unterdessen größer ausfallen. Homogenitätsbewertungen unter ausschließlicher Angabe von relativen Werten sind davon hingegen, unter Annahme eines räumlich konstanten Farbortes, nicht berührt. Bei den diskutierten Unsicherheiten handelt sich um systematische Fehler, die somit auf die Bewertungen aller Probanden die gleichen Auswirkungen zeigen.

4.4.5 Geometrische Messmittel

Die Beobachtungsabstände im Lichtkanal wurden mittels Laser Entfernungsmesser Leica DistoTM D3a BT der Firma Leica Geosystems vor Beginn der Untersuchungen ausgemessen. Die Messgenauigkeit wird bei Distanzen bis 10 m mit $\pm 1 \text{ mm}$ angegeben wobei die Abweichung ab einer Entfernung von 25 m um $\pm 0,025 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$ und ab 30 m wiederum um $\pm 0,1 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$ ansteigt [2]. Unsicherheiten, die durch das Messgerät verursacht wurden, sind systematisch und somit für jeden Probanden gleich. Die jeweiligen Positionen wurden markiert, sodass ein reproduzierbares Einstellen der Distanzen gewährleistet war.

4.5 Statistische Testverfahren

Die Untersuchungen wurden durch zwei verschiedene Verfahren ausgewertet (vgl. [122]):

1. Für jeden Probanden wurde für jede Untersuchungsbedingung der arithmetische Mittelwert $B_\alpha = \frac{|B_1 - B_2|}{2}$ aus den beiden eingestellten Helligkeitswerten berechnet. Auf Grundlage jener Mittelwerte wurde eine Varianzanalyse (ANOVA) mit anschließenden Paarvergleichen durchgeführt. Dieses Vorgehen findet in der Literatur häufig Anwendung und ist z.B. ebenso in den Arbeiten von Mennig [69] und Schiller [88] zu finden. Das angewandte statistische Testverfahren wird in den nachfolgenden Kapiteln näher beschrieben. Hierbei wird die spezielle Wahl des Verfahrens erläutert sowie auf deren Voraussetzung und die praktische Vorgehensweise anhand der Untersuchungsdaten eingegangen (siehe Kapitel 4.5.1, Kapitel 4.5.2, Kapitel 4.5.3).

2. ⁵ Um die Differenz zwischen den Werten B_1 und B_2 ebenfalls in der Auswertung zu berücksichtigen, wurde zum Vergleich das Intervall $[B_1, B_2]$ als optimaler Helligkeitsbereich interpretiert. Somit fließt die Information der Intervallbreite in die Auswertung mit ein. Im Folgenden wurde für jeden Helligkeitswert B_i ermittelt, wie häufig er unter den jeweiligen Bedingungen von allen Probanden insgesamt als optimal gewertet wurde. Hierbei sind alle Werte innerhalb des Intervalls $[B_1, B_2]$ gleichberechtigt. Nach einer Normierung auf die Anzahl der Probanden entstehen so relative Häufigkeitsverteilungen für jede bewertete Bedingung (vgl. Mortimer [73]). Die Verteilungen wurden anschließend mit Normalverteilungen gefittet. Der Mittelwert der Verteilung B_μ wird als Wert der optimalen Helligkeit gedeutet. Für alle Fits konnte ein Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,9$ ermittelt werden.

4.5.1 Wahl des statistischen Testverfahrens

Zur Untersuchung gegenseitiger Abhängigkeiten der im Probandentest variierten und untersuchten Größen sowie signifikanter Unterschiede zwischen einzelnen Mittelwerten können diverse statistische Verfahren eingesetzt werden. Generell bieten sich hierzu parametrische und nichtparametrische Tests an. Im Gegensatz zu den nichtparametrischen Tests ist die Voraussetzung für die Anwendung eines parametrischen Tests das Vorliegen einer bestimmten Verteilungsform des untersuchten Datensatzes (vgl. [20]). In der Praxis wird jedoch aufgrund der höheren Teststärke auch bei Verletzung der Bedingung gerne auf einen parametrischen Test zurückgegriffen (siehe z.B. [70], [43]). Ebenso kann so ein erhöhter Fehler 2. Art vermieden werden (vgl. [85]). Im Rahmen dieser Arbeit wird mit dem Verfahren der Varianzanalyse (ANOVA) ein parametrisches Verfahren angewendet. Die Prüfung der notwendigen Gegebenheit der Normalverteilung wird im folgenden Unterkapitel behandelt.

Die untersuchten Größen bzw. Variablen können in abhängige und unabhängige Variablen gruppiert werden. Nach Bortz und Schuster [21] versteht man unter den unabhängigen Variablen jene Größen, deren Auswirkungen auf die abhän-

⁵Zu Verfahren 2 vgl. auch die vorherige Publikation des Autors [118], [117] sowie die vom Autor betreute Arbeit von Ollig [128].

gigen Variablen untersucht werden sollen. Im konkreten Fall dieser Arbeit kann somit folgende Klassifikation durchgeführt werden:

- **Untersuchung 1**

- *unabhängige Variablen:* Beobachtungsabstand d , Flächengröße A
- *abhängige Variable:* optimale Helligkeit/Dimmstufe B

- **Untersuchung 2**

- *unabhängige Variablen:* Beobachtungsabstand d , Leuchtflächegeometrie
- *abhängige Variable:* optimale Helligkeit/Dimmstufe B

- **Untersuchung 3**

- *unabhängige Variablen:* Beobachtungsabstand d , Durchlaufdauer t
- *abhängige Variable:* optimale Helligkeit/Dimmstufe B .

Es wurde somit in allen drei Untersuchungen nach bereits beschriebener gleichbleibender Methodik die optimale Helligkeit bzw. Dimmstufe B als abhängige Variable bewertet. Die Untersuchungen wurden mit jeweils zwei unabhängigen Variablen durchgeführt, wobei der Beobachtungsabstand d in allen drei Tests variiert wurde. Zur Berücksichtigung möglicher Wechselwirkungen zwischen jenen beiden Variablen ist somit eine zweifaktorielle ANOVA durchzuführen (vgl. [19], [12]).

Ein besonderes Augenmerk muss für die Durchführung statistischer Analyseverfahren schließlich auf die Art der Stichprobe fallen. Hierbei ist im Besonderen zwischen unabhängigen und abhängigen Stichproben zu unterscheiden. Da in den durchgeführten Untersuchungen die optimale Helligkeit (abhängige Variable) von jedem Probanden unter verschiedenen Bedingungen (unabhängige Variable) mehrmals bewertet wurde, handelt es sich um Messwiederholungen, aus welchen abhängige Datensätze resultieren (vgl. [20]). Diese zusätzlichen Interaktionen sind bei der Anwendung der ANOVA zu beachten (vgl. auch [21]). Im Rahmen dieser Arbeit wird demnach eine 2-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung angewendet.

4.5.2 Voraussetzungen

Zur Anwendung einer ANOVA sind die Datensätze im Wesentlichen auf zwei Voraussetzung zu prüfen ([63]):

- *Normalverteilung der Residuen*
- *Varianzhomogenität.*

Mehrere Autoren (z.B. [19], [85], [21]) weisen auf die Gültigkeit des zentralen Grenzwerttheoremes hin, wonach für große Stichprobenumfänge (meist $n > 30$) Normalverteilung angenommen werden kann. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Stichprobenumfänge betrugen 29 (Untersuchung 1) und 27 (Untersuchung 2 und 3) und liegen somit nur geringfügig unter dem genannten Wert. Sachs und Hedderich [85] zeigen zudem auf, dass die Annahme der Normalverteilung ohnehin stets höchstens angenähert gültig ist.

Im Gegensatz zur Voraussetzung der Normalverteilung, schützen große Stichproben nach Blanca et al. [17] jedoch nicht vor Inhomogenitäten in den Varianzen. Generell empfehlen Blanca et al. [17] bereits beim Design der Studie auf gleiche oder zumindest ähnliche Stichprobenumfänge zu achten, um Varianzinhomogenitäten entgegenzuwirken.

Box [22] resümiert, dass unter der Gegebenheit ähnlicher Gruppengrößen bzw. Stichprobenumfänge das ANOVA Testverfahren nur gering durch Ungleichheiten in der Varianz beeinflusst wird. Zusammen mit der Annahme nur geringer Auswirkungen durch Verletzungen der Voraussetzung der Normalverteilung, hält Box [22] das Modell unter den meisten praktischen Bedingungen für sicher. Er [22] formuliert: „*To make the preliminary test on variances is rather like putting to sea in a rowing boat to find out whether conditions are sufficiently calm for an ocean liner to leave port!*“.

Auch Lüpsen [63] geht im Fall ähnlicher Stichprobenumfänge von nur geringen Störeinflüssen durch nicht normalverteilte Residuen und inhomogene Varianzen aus und rät auch bei Verletzung der Voraussetzung zur Anwendung des Verfahrens.

Beide Voraussetzungen sollen in dieser Arbeit vor der Anwendung der ANOVA bewertet und die Ergebnisse interpretiert werden. Anstelle der Prüfung der

Normalverteilung der Residuen erfolgt eine Analyse der Verteilung der Mittelwerte B_α . Hierzu wird von Lüpsen [63] auf zusätzliche personenspezifische Effekte hingewiesen, die sich durch die Messwiederholungen ergeben. Aufgrund der Robustheit der ANOVA gegenüber Verletzungen der Normalverteilung und des großen Stichprobenumfangs wird an dieser Stelle jedoch auf eine Berücksichtigung jener Effekte zur Beurteilung der Verteilung verzichtet. Im Falle der Varianzhomogenität werden Personeneffekte einbezogen. Man spricht dann von einer Prüfung auf Sphärizität [63].

Zusammengefasst werden demnach im Rahmen dieser Arbeit folgende zwei Faktoren vor der Anwendung der 2-faktoriellen ANOVA mit Messwiederholung bewertet:

- *Normalverteilung der Mittelwerte B_α*
- *Sphärizität der Häufigkeitsverteilungen der Mittelwerte B_α .*

Zur Prüfung auf Normalverteilung bieten sich diverse grafische (Histogramm Plot, Q-Q Diagramm) und rechnerische Methoden (Jarque-Bera Test, Kolmogorov-Smirnov Test, Shapiro-Wilk Test) an. Eine Zusammenfassung findet sich z.B. in Ghasemi und Zahediasl [39] oder Öztuna et al. [76]. Zum einen soll in dieser Arbeit der Test von Jarque und Bera [50] (siehe auch [15]) zur Bewertung der Normalverteilung Anwendung finden, da er nach Untersuchungen von Öztuna et al. [76] die besten Ergebnisse bei normalverteilten Stichproben liefert. Zusätzlich wird der Test nach Shapiro und Wilk [93] durchgeführt, welcher robustere Ergebnisse für nicht normalverteilte Stichproben liefert (vgl. [76]). Die Sphärizität wird auf Grundlage des Verfahrens nach Mauchly [67] untersucht.

4.5.3 Vorgehensweise

Wie zuvor beschrieben, wird zunächst die Normalverteilung der Mittelwerte B_α überprüft. Die durchgeführten Jarque-Bera und Shapiro-Wilk Tests sollen jedoch lediglich als zusätzliche Bewertungsstütze dienen. Auf Grundlage der zuvor geführten Diskussion und hierbei insbesondere der Tatsache der Robustheit der ANOVA gegenüber Verletzungen normalverteilter Stichproben, wird an der Varianzanalyse festgehalten. Die Ergebnisse sind zu Beginn von Kapitel 4.6.1, Kapi-

tel 4.6.2 und Kapitel 4.6.3 zu finden. Ebenso werden die Datensätze auf Sphärizität untersucht. Ist keine Sphärizität gegeben, so wird die ANOVA auf Grundlage eines modifizierten F-Tests durchgeführt [63] (vgl. auch [21]). Korrekturen können z.B. durch die Verfahren von Greenhouse und Geisser [42] oder Huynh und Feldt [47] vorgenommen werden (vgl. [63]). In dieser Arbeit wird das Korrekturverfahren nach Greenhouse und Geisser [42] angewendet, da es als konservativer angesehen wird [63]. Die Nullhypothese H_0 lautet, dass die unabhängige Variable jeweils keinen Einfluss auf die abhängige Variable nimmt. Das Signifikanzniveau wird auf $\alpha_{sig} = 0,05$ festgelegt (vgl. z.B. [21]).

In mehrfaktoriellen Versuchsdesigns muss neben den untersuchten Wirkungen der unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable (Haupteffekte) auch die Interaktion zwischen den einzelnen unabhängigen Variablen berücksichtigt werden. Besteht keine Interaktion, so sind die Ergebnisse der mehrfaktoriellen ANOVA für die einzelnen unabhängigen Variablen global gültig [63]. Am Beispiel von Untersuchung 1 würde dies bedeuten, dass bei einem signifikanten Einfluss der Flächengröße A auf die optimale Helligkeit, dies für alle Beobachtungsabstände d gilt. Wird hingegen eine Interaktion festgestellt so scheitert das Rechenmodell [49] (vgl. auch Lüpsen [63]). Eine Analyse der einfachen Haupteffekte ist dann notwendig. Lüpsen [63] schlägt hierzu die separate Durchführung einfaktorieller ANOVAs für jede unabhängige Variable vor (vgl. auch [88]). Am konkreten Fall von Untersuchung 1 würden somit einfaktorielle ANOVAs mit der unabhängigen variablen Flächengröße A nacheinander für alle Beobachtungsabstände d durchgeführt werden. Im Anschluss würde die Berechnung für die abhängige Variable d bei Berücksichtigung aller Flächengrößen erfolgen.

Streng genommen fließen im parametrischen Fall zur Berechnung der einfachen Haupteffekte die Fehlertherme und Freiheitsgrade aus der zweifaktoriellen ANOVA ein [63]. Lüpsen [63] weist jedoch darauf hin, dass die Ergebnisse ohne Korrektur konservativer ausfallen. Aus diesem Grund soll sich in dieser Arbeit auf die Durchführung einer einfaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung ohne Berücksichtigung der zweifaktoriellen Ergebnisse beschränkt werden. Ebenfalls hält er [63] unter Verweis auf Winer et al. [111] eine Anpassung des α -Fehlers aufgrund der mehrfachen Tests nicht für notwendig.

Zur Ermittlung signifikanter Unterschiede zwischen den verschiedenen un-

tersuchten Szenarien, findet nach der Durchführung der ANOVAs eine Post-hoc Analyse in Form von Paarvergleichen statt. Hierzu wird Tukeys HSD (honestly significant differences) Methode (nach Tukey [105]) angewendet, welche auch als Tukey-Kramer Verfahren bekannt ist. Es wird von Janssen und Laatz [49] gegenüber anderen Verfahren wie der Scheffé Prozedur oder der Methode nach Bonferroni als üblichstes und robustestes Verfahren eingeschätzt, selbst wenn Voraussetzungen zur Anwendung nicht erfüllt sind. Für die Vergleiche wird ein Signifikanzniveau von 0,05 festgelegt.

4.6 Auswertung der Untersuchungen

Im Folgenden sind die Resultate der statistischen Auswertung für Untersuchung 1, 2 und 3 zu finden. Hierzu werden die zu Beginn von Kapitel 4.5 erläuterten Analyseverfahren angewendet. Zunächst widmen sich pro Untersuchung drei Unterkapitel ausschließlich Verfahren 1. Hierbei werden die Voraussetzungen für das Testverfahren, sowie die Interaktion der unabhängigen Variablen geprüft. Anschließend folgt eine Untersuchung der Haupteffekte und eine Post-hoc Analyse in Form von Paarvergleichen. Final werden die Ergebnisse grafisch erläutert und mit den Resultaten aus Verfahren 2 verglichen.

Die Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit wurden mit der Software MATLAB von MathWorks durchgeführt.

4.6.1 Untersuchung 1: Variation der Leuchtflächengröße A

Überprüfung der Voraussetzungen

Die Stichproben der verschiedenen untersuchten Szenarien können auf Grundlage des Jarque-Bera sowie des Shapiro-Wilk Testes allesamt als normalverteilt angenommen werden. Nach der Prüfung der beiden Haupteffekte, resultierend aus der Variation der Flächengröße ($p = 8,06 \cdot 10^{-7}$) und des Beobachtungsabstands d ($p = 1,14 \cdot 10^{-14}$) sowie deren Interaktion ($p = 6,07 \cdot 10^{-3}$), kann von einer Verletzung der Sphärizität ausgegangen werden. Die F-Werte werden daher mittels der Methode nach Greenhouse und Geisser zur Durchführung der 2-faktoriellen

ANOVA korrigiert.

Überprüfung auf Interaktion der unabhängigen Variablen

Zwischen den beiden unabhängigen Variablen Flächengröße und Beobachtungsabstand ergibt sich eine signifikante Interaktion ($p = 0,023$, korrigiert nach Greenhouse und Geisser). Das Rechenmodell der 2-faktoriellen ANOVA kann somit nicht weiter angewendet werden. Es werden daher zur Prüfung der einfachen Haupteffekte im Folgenden getrennt einfaktorielle ANOVAs für die beiden unabhängigen Variablen durchgeführt.

Untersuchung der einfachen Haupteffekte (einfaktoriell)

Vor der Untersuchung der einfachen Haupteffekte mittels einfaktorieller ANOVAs wurde zunächst für jede Bedingung bzw. Parametervariation ein Test auf Sphärizität nach Mauchly durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4.2 zusammengefasst. Demnach kann für alle Bedingungen Sphärizität angenommen werden. Eine Korrektur der F-Statistik ist nicht notwendig.

Wie die Ergebnisse der Varianzanalyse in Tab. 4.3 verdeutlichen, kann bei je-

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Prüfung auf Sphärizität für Untersuchung 1. Nach dem Mauchly Test kann für die Datensätze aller Szenarien Sphärizität angenommen werden. Eine Korrektur ist daher nicht nötig.

Parameter	p aus Mauchly Test	Korrektur
$d = 5m$	0,01	nein
$d = 10m$	$5,49 \cdot 10^{-5}$	nein
$d = 20m$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	nein
$d = 30m$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	nein
$d = 50m$	$2,84 \cdot 10^{-3}$	nein
$d = 70m$	0,038	nein
$d = 100m$	$1,31 \cdot 10^{-4}$	nein
$A = 46,1 cm^2$	$4,68 \cdot 10^{-8}$	nein
$A = 103,6 cm^2$	$2,63 \cdot 10^{-4}$	nein
$A = 184,2 cm^2$	$2,06 \cdot 10^{-11}$	nein

der eingestellten Beobachtungsentfernung $d = 5m$, $d = 10m$, $d = 20m$, $d = 30m$,

$d = 50m$, $d = 70m$ sowie $d = 100m$ ein signifikanter Effekt der Flächengröße auf die bewertete optimale Helligkeit festgestellt werden. Ebenfalls ergibt sich aus den ANOVAs für die verschiedenen Flächengrößen $A = 46,1\text{ cm}^2$, $A = 103,6\text{ cm}^2$ und $A = 184,2\text{ cm}^2$ durchgängig ein signifikanter Einfluss des Beobachtungsabstandes auf die abhängige Variable.

Die Paarvergleiche (Tab. 4.4, Tab. 4.5) schlüsseln die Ergebnisse aus den durch-

Tabelle 4.3: Darstellung der Ergebnisse der Varianzanalyse für Untersuchung 1. Für alle Beobachtungsabstände d kann ein signifikanter Einfluss der Flächengröße A auf die abhängige Variable festgestellt werden. Ebenfalls zeigt sich ein signifikanter Effekt des Beobachtungsabstandes.

Parameter	p aus ANOVA	sig. Einfluss von A bzw. d
$d = 5m$	$8,99 \cdot 10^{-7}$	ja
$d = 10m$	$4,55 \cdot 10^{-9}$	ja
$d = 20m$	$7,21 \cdot 10^{-8}$	ja
$d = 30m$	$3,63 \cdot 10^{-3}$	ja
$d = 50m$	$7,36 \cdot 10^{-4}$	ja
$d = 70m$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	ja
$d = 100m$	$5,93 \cdot 10^{-6}$	ja
$A = 46,1\text{ cm}^2$	$8,5 \cdot 10^{-11}$	ja
$A = 103,6\text{ cm}^2$	$5,31 \cdot 10^{-15}$	ja
$A = 184,2\text{ cm}^2$	$3,32 \cdot 10^{-21}$	ja

geführten Varianzanalysen weiter auf. In Tab. 4.4 sind für jede im Test eingestellte Beobachtungsentfernung d alle möglichen Kombinationen der abgefragten Flächengrößen verglichen. Es fällt auf, dass zwischen der kleinsten eingestellten Flächengröße von $46,1\text{ cm}^2$ und der größten von $184,2\text{ cm}^2$ bei allen Beobachtungsentfernungen d eine signifikante Differenz der Bewertungen zu beobachten ist. Der Einfluss der Flächengröße auf die Bewertung der optimalen Helligkeit wird demnach auch hier eindeutig sichtbar. Zwischen $d = 30$ und $d = 70$ zeigt sich ein weiterer Effekt: Zwischen den Flächengrößen $46,1\text{ cm}^2$ und $103,6\text{ cm}^2$ bzw. $103,6\text{ cm}^2$ und $184,2\text{ cm}^2$ können keine signifikanten Differenzen festgestellt werden. Liegt der Flächenfaktor zwischen der größten ($184,2\text{ cm}^2$) und kleinsten Fläche ($46,1\text{ cm}^2$) noch bei 4, so verringert er sich in den genannten Vergleichen auf 2,25 bzw. 1,78.

Tab. 4.5 fasst alle Ergebnisse aus den Paarvergleichen der verschiedenen Beobachtungsentfernungen d zusammen. Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass eine signifikante Differenz zwischen jenen Bewertungen bei einer Beobachtungsentfernung von $d = 5m$ und jenen bei allen weiteren Beobachtungsentfernungen liegt und dies gleichsam für alle eingestellten Flächengrößen von $46,1\text{ cm}^2$, $103,6\text{ cm}^2$ und $184,2\text{ cm}^2$. Für $A = 46,1\text{ cm}^2$ zeigt bereits der Vergleich zwischen den Bewertungen für $10m$ und $20m$ keine signifikante Differenz auf. Alle weiteren Vergleiche höherer Beobachtungsentfernungen zeigen ebenfalls keinen signifikanten Unterschied.

Zwischen $d = 5m$ und $d = 10m$ ändert sich somit im Falle einer Flächengröße von $A = 46,1\text{ cm}^2$ die Bewertung der optimalen Helligkeit. Darüber hinaus kann von einer konstanten Beurteilung ausgegangen werden. Ähnliche Bewertungsmuster zeigen sich für die eingestellten Flächengrößen von $103,6\text{ cm}^2$ und $184,2\text{ cm}^2$. In beiden Fällen kann von gleichen Bewertungen der Werte für $d > 30m$ ausgegangen werden. Der Bereich zwischen $10m$ und $30m$ zeigt hierbei speziell für die $d = 10m$ Paarvergleiche keine eindeutige Tendenz. Hierzu wird im späteren Verlauf der Arbeit noch auf Auswertemethode 2 (siehe Beginn Kapitel 4.5) zurückgegriffen. Grob können die Resultate jedoch bereits in einen variablen Nahbereich und konstanten Fernbereich eingeteilt werden.

Tabelle 4.4: Darstellung der Ergebnisse der Paarvergleiche zwischen den einzelnen Flächengrößen A für die diversen in Untersuchung 1 eingestellten Beobachtungsabstände d.

(a) Darstellung der Ergebnisse bis $d = 20\text{ m}$.

Paarvergleich		$d = 5\text{ m}$		$d = 10\text{ m}$		$d = 20\text{ m}$	
$A_A\text{ (cm}^2\text{)}$	$A_B\text{ (cm}^2\text{)}$	p	sig. Diff.	p	sig. Diff.	p	sig. Diff.
46,1	103,6	0,077	nein	$4,19 \cdot 10^{-3}$	ja	0,02	ja
46,1	184,2	$3,22 \cdot 10^{-5}$	ja	$4,59 \cdot 10^{-7}$	ja	$1,47 \cdot 10^{-5}$	ja
103,6	184,2	$7,6 \cdot 10^{-5}$	ja	$3,2 \cdot 10^{-5}$	ja	$1,37 \cdot 10^{-5}$	ja

(b) Fortsetzung der obigen Tabelle für $d = 30\text{ m}$ bis $d = 100\text{ m}$.

Paarvergleich		$d = 30\text{ m}$		$d = 50\text{ m}$		$d = 70\text{ m}$		$d = 100\text{ m}$	
$A_A\text{ (cm}^2\text{)}$	$A_B\text{ (cm}^2\text{)}$	p	sig. Diff.	p	sig. Diff.	p	sig. Diff.	p	sig. Diff.
46,1	103,6	0,197	nein	0,062	nein	$3,64 \cdot 10^{-3}$	ja	$7,66 \cdot 10^{-3}$	ja
46,1	184,2	0,015	ja	$4,99 \cdot 10^{-3}$	ja	$4 \cdot 10^{-3}$	ja	$2,43 \cdot 10^{-4}$	ja
103,6	184,2	0,016	ja	0,116	nein	0,968	nein	0,028	ja

Tabelle 4.5: Untersuchung 1: Auflistung der Paarvergleiche zwischen den diversen Beobachtungsabständen d für die einzelnen bewerteten Flächengrößen A .

Paarvergleich	$A = 46,1 \text{ cm}^2$	$A = 103,6 \text{ cm}^2$	$A = 184,2 \text{ cm}^2$
d_A (m) d_B (m)	p sig. Diff.	p sig. Diff.	p sig. Diff.
5 10	$7,53 \cdot 10^{-7}$ ja	$4,05 \cdot 10^{-6}$ ja	$5,27 \cdot 10^{-8}$ ja
5 20	$3,23 \cdot 10^{-6}$ ja	$5,18 \cdot 10^{-8}$ ja	$3,91 \cdot 10^{-8}$ ja
5 30	$1,23 \cdot 10^{-5}$ ja	$2,86 \cdot 10^{-7}$ ja	$3,98 \cdot 10^{-8}$ ja
5 50	$1,33 \cdot 10^{-4}$ ja	$8,59 \cdot 10^{-5}$ ja	$4,64 \cdot 10^{-7}$ ja
5 70	$1,31 \cdot 10^{-4}$ ja	$1,64 \cdot 10^{-4}$ ja	$5,21 \cdot 10^{-6}$ ja
5 100	$2,33 \cdot 10^{-4}$ ja	$1,06 \cdot 10^{-3}$ ja	$3,06 \cdot 10^{-5}$ ja
10 20	0,209 nein	$2,45 \cdot 10^{-4}$ ja	0,045 ja
10 30	0,956 nein	$1,45 \cdot 10^{-3}$ ja	$1,38 \cdot 10^{-3}$ ja
10 50	0,956 nein	0,24 nein	0,023 ja
10 70	0,741 nein	0,685 nein	0,061 nein
10 100	0,776 nein	0,795 nein	0,445 nein
20 30	0,898 nein	0,997 nein	0,034 ja
20 50	0,954 nein	0,974 nein	0,5 nein
20 70	$> 0,05$ nein	0,281 nein	0,519 nein
20 100	$> 0,05$ nein	0,576 nein	$> 0,05$ nein
30 50	$> 0,05$ nein	0,996 nein	0,996 nein
30 70	0,917 nein	0,177 nein	$> 0,05$ nein
30 100	0,958 nein	0,586 nein	0,221 nein
50 70	0,864 nein	0,601 nein	0,997 nein
50 100	0,96 nein	0,896 nein	0,266 nein
70 100	$> 0,05$ nein	$> 0,05$ nein	0,131 nein

Grafische Darstellung und Vergleich mit Verfahren 2⁶

Die Ergebnisse der Analyse für Untersuchung 1 sind grafisch in Abb. 4.11, Abb. 4.12 und Abb. 4.13 für die Flächengrößen $A = 46,1 \text{ cm}^2$, $A = 103,6 \text{ cm}^2$ und $A = 184,2 \text{ cm}^2$ dargestellt. Die Daten nach Verfahren 1 sind in Form von Boxplots dargestellt. Die Umrechnung in Leuchtdichtewerte erfolgte mittels Gl. (4.1). Das obere und untere Ende der Box kennzeichnet jeweils das 25% und 75% Perzentil. Der Median L_{med} ist durch eine waagerechte Linie innerhalb der Box markiert. Die Länge der Antennen ist auf das 1,5-fache des Interquartilsabstandes begrenzt. Ausreißer zeigen sich hierbei für $A = 46,1 \text{ cm}^2$ und $A = 103,6 \text{ cm}^2$ lediglich für einen Beobachtungsabstand von $d = 70 \text{ m}$ bzw. $d = 5 \text{ m}$. Für die Flächengröße von $A = 184,2 \text{ cm}^2$ sind Ausreißer für die Beobachtungsentfernungen $d = 5 \text{ m}$, $d = 10 \text{ m}$, $d = 20 \text{ m}$, $d = 30 \text{ m}$, $d = 50 \text{ m}$ festzustellen.

Zum Vergleich der Auswerteverfahren, sind in Abb. 4.11, Abb. 4.12 und Abb. 4.13 zusätzlich die Resultate nach Verfahren 2 berücksichtigt. Die mittlere Leuchtdichte L_μ berechnet sich hierbei aus B_μ nach Gl. (4.1) und ist in den Grafiken als Kreis eingezeichnet. Größere Abweichungen des L_μ Wertes vom Median Wert L_{med} aus der Analyse nach Verfahren 1 sind insbesondere für $A = 184,2 \text{ cm}^2$ festzustellen (vgl. Abb. 4.13). Hierbei zeigt sich eine maximale Abweichung der mittleren Leuchtdichte L_μ von der medianen Leuchtdichte L_{med} bei 70 m (27%). Tendenziell liegen die Werte für L_μ für Untersuchung 1 oberhalb von L_{med} . Trotz guter Voraussetzungen zur Anwendung beider Verfahren unterstreicht die Diskrepanz der Resultate die Sinnhaftigkeit der Anwendung multipler Analysewege, auch wenn sich in der Praxis häufig auf die Varianzanalyse beschränkt wird.

Zur weiteren Analyse der Bewertungen können die Häufigkeitsverteilungen nach Verfahren 2 näher untersucht werden. Wie aus der Varianzanalyse gefolgert werden konnte, lassen sich die Bewertungen in einen Nahbereich und einen Fernbereich gruppieren. Abb. 4.14 zeigt hierzu beispielhaft für die Beobachtungsabstände von 5 m (Nahbereich) und 70 m (Fernbereich) die ermittelten relativen Häufigkeiten aufgetragen gegen die Lichtstärke I bzw. Leuchtdichte L . Zum Vergleich sind die Daten für $A = 46,1 \text{ cm}^2$, $A = 103,6 \text{ cm}^2$ und $A = 184,2 \text{ cm}^2$ eingezeichnet. Die Kurven sind geglättet. Hierzu wurde ein Savitzky-Golay Filter unter

⁶Einige Teile des Kapitels basieren auf einer vorherigen Publikation des Autors [118], [117].

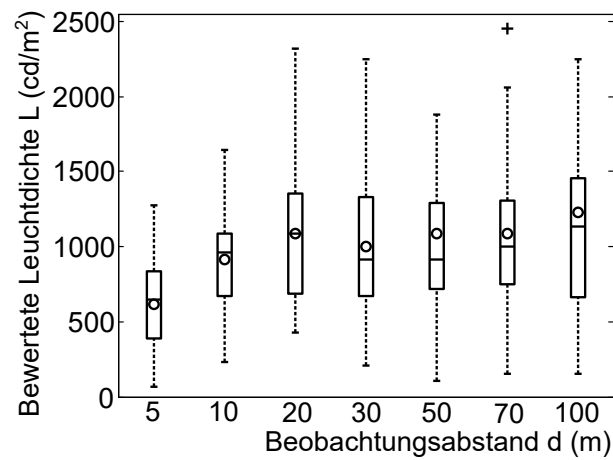


Abbildung 4.11: Darstellung der $A = 46,1 \text{ cm}^2$ Daten (Verfahren 1) aus Untersuchung 1 als Boxplots. Die Mediane L_{med} sind als waagerechte Linien markiert. Die Mittelwerte L_{μ} nach Verfahren 2 sind als Kreise eingezeichnet.

Benutzung eines Polynom zweiten Grades angewendet.

Im Falle der Lichtstärke I kann eine größere Diskrepanz der Verteilungen insbesondere im Fernbereich für $d = 70 \text{ m}$ festgestellt werden. Die ebenfalls in

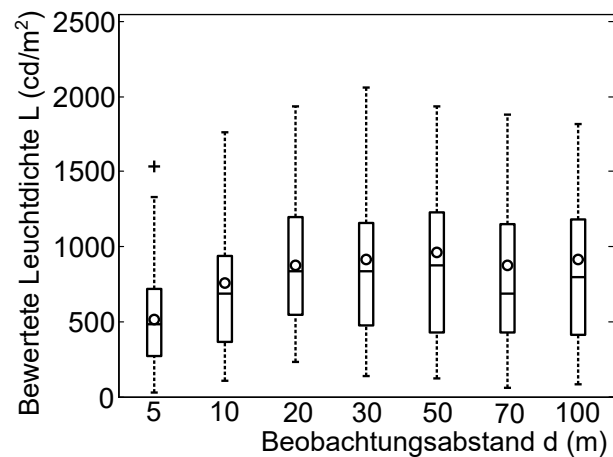


Abbildung 4.12: Darstellung der $A = 103,6 \text{ cm}^2$ Daten (Verfahren 1) aus Untersuchung 1 als Boxplots. Die Mediane L_{med} sind als waagerechte Linien markiert. Die Mittelwerte L_{μ} nach Verfahren 2 sind als Kreise eingezeichnet.

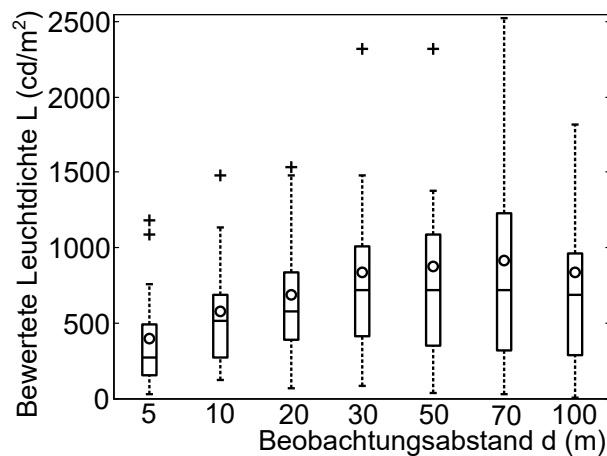


Abbildung 4.13: Darstellung der $A = 184,2 \text{ cm}^2$ Daten (Verfahren 1) aus Untersuchung 1 als Boxplots. Die Mediane L_{med} sind als waagerechte Linien markiert. Die Mittelwerte L_{μ} nach Verfahren 2 sind als Kreise eingezeichnet.

Abb. 4.14 dargestellten gewichteten arithmetischen Mittelwerte der Verteilung (schwarze Kreise, gestrichelte Linien) verdeutlichen dieses Verhalten. Sie liegen jedoch alle innerhalb des Korridors zwischen 4 cd und 17 cd (vgl. Tab. 2.2) und entsprechen somit den Anforderungen eines statisches Schlusslichtes nach UNECE Norm. Für die Leuchtdichte L hingegen zeigt sich sowohl im Nah- als auch im Fernbereich eine weitestgehende Übereinstimmung der Verteilungen. Auch zeigen die gewichteten Mittelwerte insbesondere im Fernbereich für $d = 70 \text{ m}$ eine bessere Übereinstimmung als ihre Lichtstärke Pendants. Besonders im Hinblick auf die Definition lichttechnischer Grenzwerte für ein Kfz-Schlusslicht ergibt sich somit ein Vorteil bei der Verwendung der Leuchtdichte anstelle der Lichtstärke. Zur weiteren Analyse sei an dieser Stelle auf die grafische Auswertung in Kapitel 4.6.2 verwiesen.

4.6.2 Untersuchung 2: Variation der Leuchtflächengeometrie

Überprüfung der Voraussetzungen

Die Prüfung auf Normalverteilung mittels Jarque-Bera und Saphiro-Wilk Test ergibt für 6 der 8 Szenarien normalverteilte Daten. In 2 Fällen ($d = 10 \text{ m}$, Streifen;

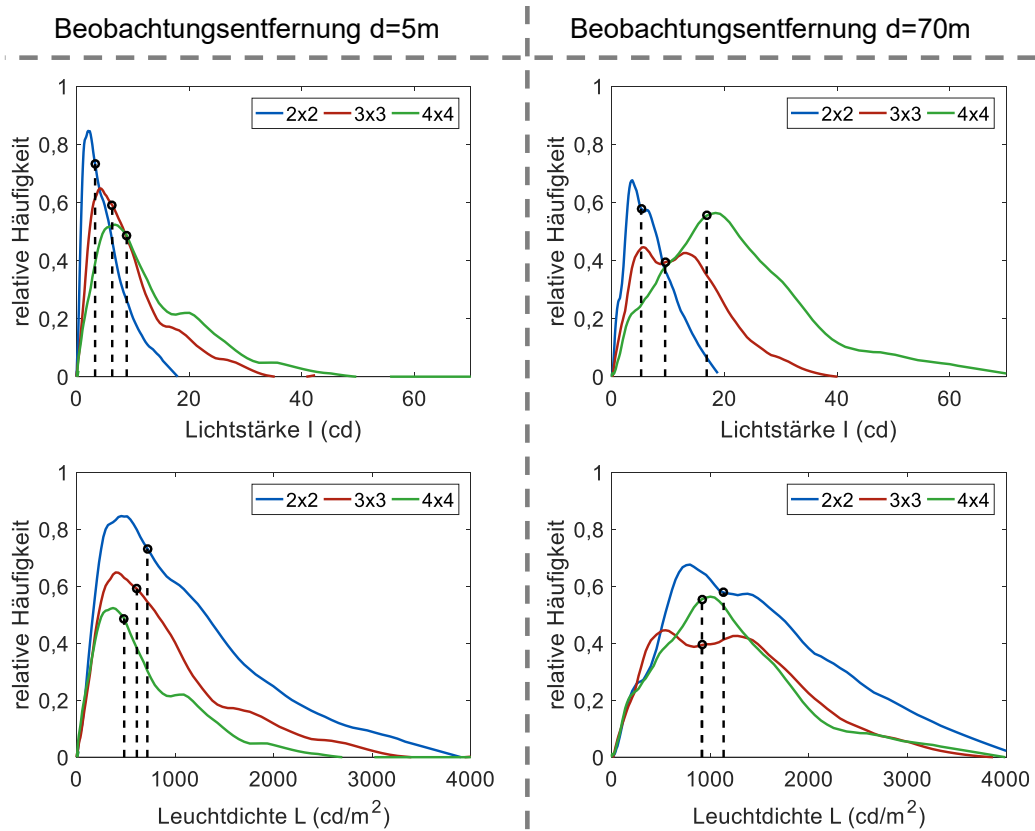


Abbildung 4.14: Darstellung der Lichtstärke- und Leuchtdichtehäufigkeitsverteilungen nach Verfahren 2. Die gewichteten arithmetischen Mittelwerte (schwarze Kreise, gestrichelte senkrechte Linien) verdeutlichen die erhöhte Übereinstimmung der Leuchtdichteverteilungen im Vergleich zu den Lichtstärkeverteilungen und dies insbesondere für einen Beobachtungsabstand von $d = 70m$ (Fernfeld) [118], [117].

$d = 20m$, Streifen) ist von einer Verletzung der Voraussetzung auszugehen. Aufgrund der Robustheit der Varianzanalyse gegen Verletzungen (siehe Kapitel 4.5.2) wird nichtsdestotrotz eine 2-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt. Tab. 4.6 fasst alle Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung zusammen.

Für die Haupteffekte (Geometrie: $p < 0,05$, Beobachtungsabstand d : $p = 6,03 \cdot 10^{-3}$) kann von einer Verletzung der Sphärizität ausgegangen werden. Daher wird bei der Durchführung einer 2-faktoriellen ANOVA eine Korrektur nach Greenhouse und Geiser vorgenommen. Für die Interaktion der Haupteffekte ergibt der Mauchly Test hingegen $p = 0,06$, was die Annahme der Sphärizität zulässt.

Tabelle 4.6: Zusammenfassung der Resultate des Jarque-Bera und Shapiro-Wilk Tests für die verschiedenen Szenarien in Untersuchung 2. Die Ergebnisse der beiden Tests gleichen sich.

Beobachtungsabstand d (m)	Geometrie	Normalverteilt nach	
		Jarque-Bera	Shapiro-Wilk
5	Streifen	ja	ja
	Linie	ja	ja
10	Streifen	nein	nein
	Linie	ja	ja
20	Streifen	nein	nein
	Linie	ja	ja
70	Streifen	ja	ja
	Linie	ja	ja

Überprüfung auf Interaktion der unabhängigen Variablen

Für die Geometrie und die Beobachtungsentfernung d kann eine nicht signifikante Interaktion angenommen werden ($p = 0,842$). Daher werden im Folgenden die Haupteffekte als Ergebnis der 2-faktoriellen ANOVA interpretiert.

Untersuchung der Haupteffekte (2-faktoriell)

Aus der 2-faktoriellen ANOVA mit Messwiederholung ergibt sich ein signifikanter Einfluss der Geometrie ($p = 0,046$, korrigiert nach Greenhouse und Geiser) auf die Bewertung der optimalen Helligkeit. Ebenso kann ein signifikanter Effekt des Beobachtungsabstandes d ($p = 2,86 \cdot 10^{-17}$, korrigiert nach Greenhouse und Geiser) auf die abhängige Variable festgestellt werden.

Die Paarvergleiche für Untersuchung 2 sind in Tab. 4.7 zusammengefasst. Tab. 4.7a zeigt den Paarvergleich für die Geometrie aus drei Streifen und die linienförmige Geometrie für die eingestellten Beobachtungsentfernungen von $d = 5\text{ m}$, $d = 10\text{ m}$, $d = 20\text{ m}$, $d = 70\text{ m}$. Nach den Resultaten aus Untersuchung 1 ist von drei Distanzen ($d = 5\text{ m}$, $d = 10\text{ m}$, $d = 20\text{ m}$) im variablen Nahbereich und mit der Beobachtungsentfernung $d = 70\text{ m}$ zudem von einer Distanz im Fernbereich auszugehen. Für keine der Distanzen zeigt sich eine signifikante Differenz zwi-

schen den Bewertungen der beiden Geometrien. Für $d = 70m$ kann mit $p = 0,069$ die niedrigste Wahrscheinlichkeit nahe des Signifikanzniveaus von 0,05 ermittelt werden. Liefert die ANOVA zwar als Ergebnis einen signifikanten Einfluss der Geometrie auf die bewertete optimale Helligkeit, so liegt die korrigierte Wahrscheinlichkeit mit $p = 0,046$ nur minimal unterhalb des Signifikanzniveaus. Für Cohens Effektstärkemaß (Cohen's d) kann für den Vergleich bei $d = 70m$ 1,9 ermittelt werden, was nach Cohen [27] einem großen Effekt entspricht. Trotz widersprüchlichen Resultats aus den Paarvergleichen, lassen ANOVA und das Effektstärkemaß daher final auf einen Einfluss der Geometrie auf die Bewertung der optimalen Helligkeit schließen.

Um die Bewertungen der optimalen Helligkeit der Geometrie aus drei Streifen und der linienförmigen Geometrie innerhalb der verschiedenen eingestellten Beobachtungsabstände zu vergleichen, kann Tab. 4.7b herangezogen werden. Für alle Kombinationen der Beobachtungsentfernungen d ergibt sich eine signifikante Differenz. Da mit $d = 70m$ lediglich eine Beobachtungsentfernung im Fernbereich untersucht wurde, bestätigen die Resultate die Ergebnisse aus Untersuchung 1 und sprechen ebenfalls für die Existenz eines variablen Nahbereiches.

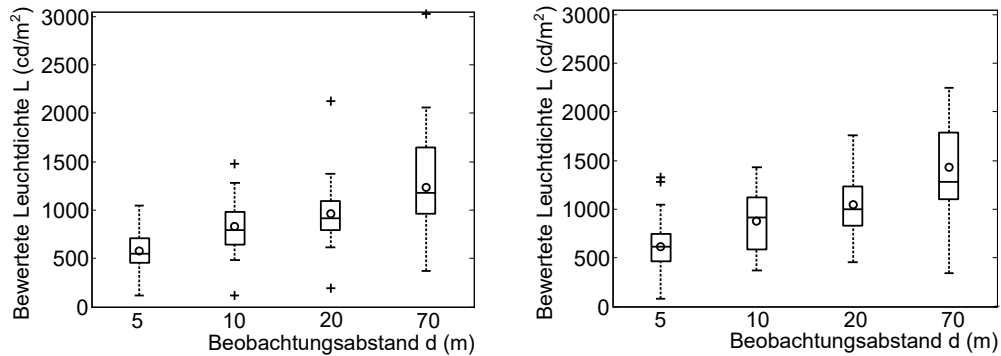
Tabelle 4.7: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Paarvergleichen für Untersuchung 2.

(a) Vergleich der Geometrie aus drei Streifen und der linienförmigen Geometrie. Die Bewertungen zeigen für keine der eingestellten Beobachtungsabstände d eine signifikante Differenz.

Paarvergleich		$d = 5m$		$d = 10m$		$d = 20m$		$d = 70m$		
$Geometrie_A$	$Geometrie_B$	p	sig. Diff.	p	sig. Diff.	p	sig. Diff.	p	sig. Diff.	
Streifen		Linie	0,446	nein	0,17	nein	0,137	nein	0,069	nein

(b) Ergebnisse aus den Paarvergleichen zwischen den verschiedenen in Untersuchung 2 eingestellten Beobachtungsabständen d . Aus allen Vergleichen ergibt sich eine signifikante Differenz.

Paarvergleich		Streifen		Linie	
d_A (m)	d_B (m)	p	sig. Diff.	p	sig. Diff.
5	10	$1,32 \cdot 10^{-8}$	ja	$5,1 \cdot 10^{-6}$	ja
5	20	$7,29 \cdot 10^{-9}$	ja	$5,65 \cdot 10^{-7}$	ja
5	70	$4,02 \cdot 10^{-9}$	ja	$4,23 \cdot 10^{-9}$	ja
10	20	$1,17 \cdot 10^{-3}$	ja	0,027	ja
10	70	$4,96 \cdot 10^{-6}$	ja	$2,91 \cdot 10^{-6}$	ja
20	70	$5,22 \cdot 10^{-4}$	ja	$5,69 \cdot 10^{-5}$	ja



(a) Die Bewertungen aufgetragen als Leuchtdichte L in Abhängigkeit des Beobachtungsabstandes d für die Geometrie aus drei Streifen. (b) Abhängigkeit der in Leuchtdichtewerte L umgerechneten Bewertungen vom Beobachtungsabstand d für die linienförmige Geometrie.

Abbildung 4.15: Darstellung der Daten nach Verfahren 1 für Untersuchung 2 in Form von Boxplots. Die Mediane L_{med} aus der Analyse nach Verfahren 1 sind als waagerechte Linien markiert. Zusätzlich sind die Mittelwerte L_{μ} nach Verfahren 2 als Kreise eingezeichnet

Grafische Darstellung und Vergleich mit Verfahren 2⁷

Analog zur Darstellung der Bewertungen von Untersuchung 1 sind die Resultate für die Geometrie „Streifen“ sowie „Linie“ aus Untersuchung 2 in Abb. 4.15 als Boxplots dargestellt. Neben dem Leuchtdichte Median L_{med} ist ebenso der Leuchtdichte Mittelwert L_{μ} nach Verfahren 2 eingezeichnet. Für die Geometrie aus drei Streifen zeigen sich wenige Ausreißer bei $d = 10\text{m}$, $d = 20\text{m}$ und $d = 70\text{m}$. Für die linienförmige Geometrie ergeben sich lediglich für die 5m Distanz Ausreißer im Datensatz. In beiden Fällen resultiert für $d = 5\text{m}$ der kürzeste Interquartilsabstand und für $d = 70\text{m}$ der Längste. Bis auf die Bewertungen für die 70m Distanz im Falle der linienförmigen Geometrie, können keine großen Abweichungen der mittleren Leuchtdichte L_{μ} von der medianen Leuchtdichte L_{med} festgestellt werden (12%). Als Zusammenfassung und Stütze zur weiteren Auswertung sind die Ergebnisse für L_{med} sowie L_{μ} in Tab. 4.8 dargestellt. Neben den Resultaten für Untersuchung 2 finden sich hier auch die Ergebnisse aus Untersuchung 1.

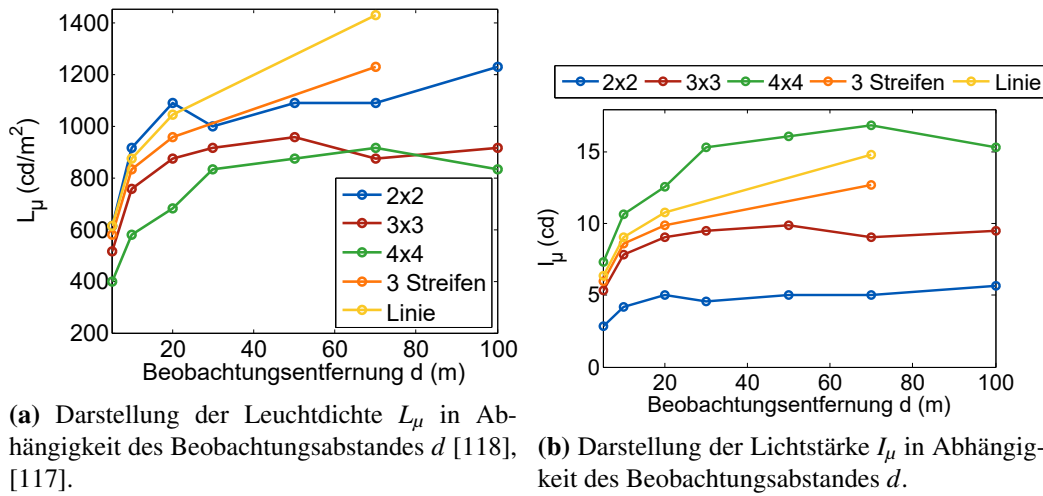
In Abb. 4.16a sind alle Leuchtdichtemittelwerte L_{μ} aus Untersuchung 1 und

⁷Einige Teile des Kapitels basieren auf einer vorherigen Publikation des Autors [118], [117].

Tabelle 4.8: Zusammenfassung der medianen Leuchtdichten L_{med} nach Verfahren 1 und mittleren Leuchtdichten L_{μ} nach Verfahren 2 für Untersuchung 1 und 2. Die Werte sind grafisch in Abb. 4.15 dargestellt.

d		46,1 cm ²	103,6 cm ²	184,2 cm ²	Streifen	Linie
5 m	$L_{med} (\frac{cd}{m^2})$	647	484	273	547	613
	$L_{\mu} (\frac{cd}{m^2})$	613	515	398	579	613
10 m	$L_{med} (\frac{cd}{m^2})$	957	683	515	795	915
	$L_{\mu} (\frac{cd}{m^2})$	915	757	579	834	874
20 m	$L_{med} (\frac{cd}{m^2})$	1089	834	579	915	1044
	$L_{\mu} (\frac{cd}{m^2})$	1089	874	682	957	1000
30 m	$L_{med} (\frac{cd}{m^2})$	915	834	719	/	/
	$L_{\mu} (\frac{cd}{m^2})$	1000	915	834	/	/
50 m	$L_{med} (\frac{cd}{m^2})$	915	874	719	/	/
	$L_{\mu} (\frac{cd}{m^2})$	1089	957	874	/	/
70 m	$L_{med} (\frac{cd}{m^2})$	1000	683	719	1182	1278
	$L_{\mu} (\frac{cd}{m^2})$	1089	874	915	1229	1430
100 m	$L_{med} (\frac{cd}{m^2})$	1135	795	683	/	/
	$L_{\mu} (\frac{cd}{m^2})$	1229	915	834	/	/

Untersuchung 2 über der Beobachtungsentfernung d aufgetragen. Bis zu einer Entfernung von ca. $d = 30m$ kann ein Anstieg der mittleren Leuchtdichte L_{μ} beobachtet werden. Darüberhinaus sind bis zu einer Distanz von $d = 100m$ insbesondere für die Flächengrößen $A = 103,6cm^2$ und $A = 184,2cm^2$ geringe Veränderungen auszumachen. Dieses Resultat nach Verfahren 2 deckt sich mit den Ergebnissen aus der Varianzanalyse nach Verfahren 1. Auch hierbei ist von einem Nah- und einem Fernbereich auszugehen. Die mittleren optimalen Leuchtdichten L_{μ} betragen im Falle von Untersuchung 1 für die Fernfelddistanzen ($d > 30m$) $1102cd/m^2$ ($A = 46,1cm^2$, Geometrie 2x2), $915cd/m^2$ ($A = 103,6cm^2$, Geometrie 3x3) und $864cd/m^2$ ($A = 184,2cm^2$, Geometrie 4x4). Bei gleicher Geometrie und Variation der Flächengröße (vgl. Untersuchung 1) ist eine Tendenz zu sinkenden mittleren Leuchtdichten L_{μ} bei wachsender Leuchtfächengröße A zu erkennen. Bei der Fernfelddistanz von $d = 70m$ liegen die Geometrien aus Untersuchung 2 trotz ihrer Leuchtfläche von $A = 103,6cm^2$ mit $L_{\mu} = 1229cd/m^2$ und $L_{\mu} = 1430cd/m^2$ hingegen oberhalb der Leuchtdichtewerte des $A = 46,1cm^2$



(a) Darstellung der Leuchtdichte L_μ in Abhängigkeit des Beobachtungsabstandes d [118], [117].

(b) Darstellung der Lichtstärke I_μ in Abhängigkeit des Beobachtungsabstandes d .

Abbildung 4.16: Aufgetragen sind die Leuchtdichte L_μ und die Lichtstärke I_μ in Abhängigkeit des Beobachtungsabstandes d . Die mittleren Leuchtdichten für die Fernfeldabstände bewegen sich je nach Geometrie zwischen 864 cd/m^2 und 1430 cd/m^2 . Die Lichtstärkewerte liegen bis auf den Wert für die 5 m Distanz im Falle der 2x2 Geometrie innerhalb des UNECE Korridors für ein Schlusslicht (vgl. Tab. 2.2). Nach einer vorherigen Publikation des Autors [118], [117].

Falles aus Untersuchung 1 ($L_\mu = 1089 \text{ cd/m}^2$).

Zur Einschätzung der Daten hinsichtlich Gesetzeskonformität sind in Abb. 4.16b ebenfalls die Lichtstärkewerte I_μ dargestellt. Beim Vergleich mit den nach UNECE vorgegebenen Werten für ein Schlusslicht (siehe Tab. 2.2) zeigt lediglich die Bewertung für die kleinste Leuchtflächengröße ($A = 46,1 \text{ cm}^2$) bei einem Abstand von $d = 5 \text{ m}$ einen I_μ -Wert unterhalb des als Minimum geforderten Lichtstärkeniveaus von 4 cd auf. Alle weiteren Werte liegen innerhalb des geforderten UNECE Intervalles für ein Schlusslicht.

Abb. 4.17 zeigt die L_μ -Werte aus Untersuchung 1 und 2 gegenüber dem Sehwinkel α aufgetragen. Hierbei wäre zumindest im Falle von Untersuchung 1 eine Annäherung der Leuchtdichtewerte für gleiche α zu erwarten, da bei gleichbleibender Geometrie der Leuchtfläche lediglich die Flächengröße ($A = 46,1 \text{ cm}^2$, $A = 103,6 \text{ cm}^2$, $A = 184,2 \text{ cm}^2$) variiert wurde. Weitere Umgebungsinformationen sind aufgrund des völlig abgedunkelten Lichtkanals minimiert. Die Resultate lassen demnach eine Simulation der Beobachtungsentfernung durch den Sehwinkel in experimentellen Studien als ungeeignet erscheinen.

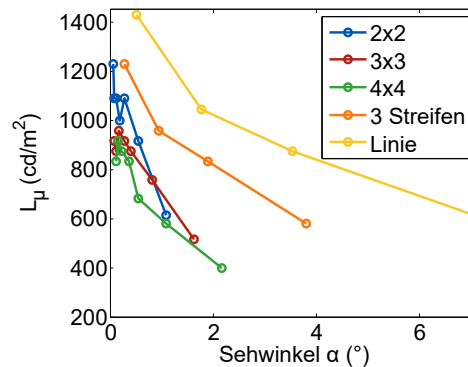


Abbildung 4.17: Darstellung der Leuchtdichte L_μ in Abhängigkeit des Sehwinkels α . Auch für die gleichen Geometrien aus Untersuchung 1 zeigen sich für identische α Unterschiede in den L_μ Werten [118], [117].

Verfahren zur Beschreibung des Helligkeitsempfindens⁸⁹

Wie sich aus der Datenanalyse nach Verfahren 2 gezeigt hat, können zwar durch die Umrechnung der Bewertungen in Leuchtdichtewerte große gemeinsame Akzeptanzintervalle zwischen den verschiedenen Flächengrößen gefunden werden (vgl. Abb. 4.14), die Varianzanalyse und Paarvergleiche (vgl. Tab. 4.4 und Tab. 4.5) nach Verfahren 1 sowie die medianen Werte und Mittelwerte zeigen hingegen Differenzen auf. Dies bestätigt sich ebenfalls für die unterschiedlichen Geometrien „Streifen“ und „Linie“ (vgl. auch Tab. 4.7). In Folge soll daher aus den Studienergebnissen ein Verfahren zur einheitlichen mathematischen Beschreibung des optimalen Helligkeitsempfindens von Schlussleuchten entwickelt werden, was eine theoretische Ermittlung der optimalen Helligkeit unter Kenntnis der Leuchtflächengröße bzw. Geometrie zulässt.

Zur Modellentwicklung werden die physiologischen Effekte innerhalb des Sehapparates betrachtet. Es wird zudem vereinfacht angenommen, dass das Helligkeitsempfinden maßgeblich durch den auf die Retina treffenden Lichtstrom Φ_{Retina} bzw. die Beleuchtungsstärke auf der Retina E_{Retina} beeinflusst wird. An dieser Stelle wird die Notwendigkeit der Verwendung einer homogenen Lichtquelle deutlich, die die Berechnung einer mittleren Beleuchtungsstärke auf der

⁸Das Kapitel basiert auf einer vorherigen Publikation des Autors [118], [117].

⁹Die Rechenschritte des Verfahrens wurden in einer vom Autor betreuten Arbeit von Patzig [129] in MATLAB implementiert.

Retina für jede dargebotene Flächengröße und Geometrie erlaubt. Zudem bestehen zur Modellbildung durch den vollständig abgedunkelten Lichtkanal ideale Bedingungen. Es kann so davon ausgegangen werden, dass alleinig das vom Heckleuchtenmodell emittierte Licht zur Empfindung beiträgt.

Zur Bewertung von E_{Retina} wird zunächst die Beleuchtungsstärke E_μ am Auge der Probanden für die diversen Szenarien nach Verfahren 2 ermittelt und sodann mit dem Pupillendurchmesser D_u multipliziert, woraus sich der ins Auge einfallende Lichtstrom Φ_{Auge} ergibt. Der Durchmesser der Pupille kann nach Watson und Yellott [109] durch folgende Gleichung in Abhängigkeit des untersuchten Szenarios beschrieben werden:

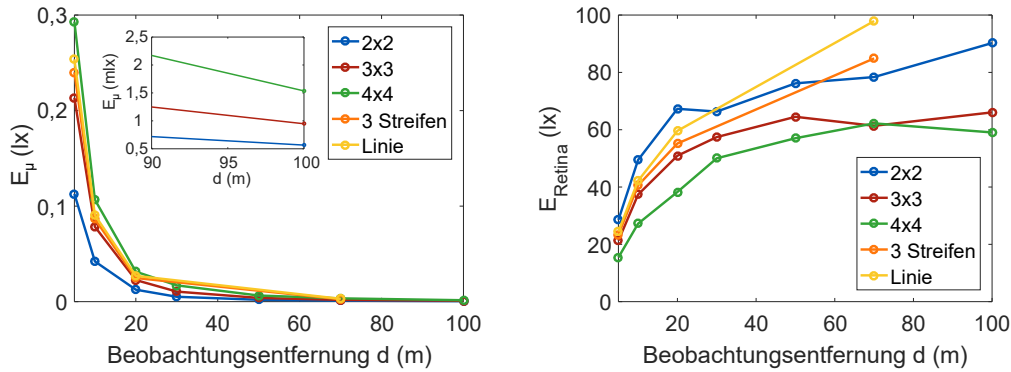
$$D_u(L_\mu, \zeta, y, y_0) = D_{SD}(L_\mu, \zeta) + (y - y_0) \cdot (0,02132 - 0,009562 \cdot D_{SD}(L_\mu, \zeta)). \quad (4.2)$$

Hierbei ist ζ die dargebotene Leuchtfläche in deg^2 . y_0 kann als Normierungskonstante für das Probandenalter verstanden werden und beträgt nach Watson und Yellott [109], basierend auf Vergleichen mit den Forschungen von Winn et al. [112], $28,58a$. Es wurde zudem $y = 26,32a$ gewählt, was dem mittleren Alter beider Probandenkollektive aus Untersuchung 1 und 2 bzw. 3 entspricht. D_{SD} geht auf Untersuchungen von Stanley und Davies [98] zurück und kann durch

$$D_{SD}(L_\mu, \zeta) = 7,75 - 5,75 \cdot \left(\frac{(L_\mu \zeta / 846)^{0,41}}{(L_\mu \zeta / 846)^{0,41} + 2} \right) \quad (4.3)$$

beschrieben werden. Aus Φ_{Auge} kann nun durch Multiplikation mit dem Augentransmissionsgrad τ_{Auge} für rotes Licht der Lichtstrom Φ_{Retina} ermittelt werden, der auf die Netzhaut trifft. τ_{Auge} wird hierbei nach Boettner und Reimer [18] mit 0,47 angenommen.

Zur Berechnung der Beleuchtungsstärke auf der Retina E_{Retina} muss final die Abbildungsgröße der dargebotenen Leuchtfläche bzw. Geometrie ermittelt werden. In Näherung kann hierzu die Linsengleichung für dünne Linsen angewendet werden. Nach dem Strahlensatz gilt demnach $\frac{G}{B} = \frac{g}{b}$ mit der entsprechenden OLED Leuchtflächenhöhe G , dem Abstand vom Leuchtenmodell zum Probanden g , der Bildweite und somit dem Glaskörperradius des Auges b und der Abbildungsgröße auf der Retina B . Die Bildweite b kann nach Pape et al. [77] mit



(a) Darstellung der Beleuchtungsstärke E_μ am Auge [118], [117]. (b) Darstellung der der Beleuchtungsstärke E_{Retina} auf der Retina [118], [117].

Abbildung 4.18: Aufgetragen sind die Beleuchtungsstärke E_μ am Auge und die Beleuchtungsstärke E_{Retina} auf der Retina in Abhängigkeit des Beobachtungsabstandes d . Zur Berechnung von E_{Retina} fließt der Pupillendurchmesser nach Gl. (4.2) ein [118], [117].

17 mm angenommen werden.

Abb. 4.18 zeigt grafisch im Vergleich die Beleuchtungsstärke E_μ am Auge und die daraus berechnete Beleuchtungsstärke E_{Retina} auf der Retina in Abhängigkeit des Beobachtungsabstandes d . Ein Vergleich der Differenzen zwischen den Beleuchtungsstärkewerten der verschiedenen Flächengrößen und Geometrien kann auf Grundlage der mittleren relativen Abweichung σ_d erfolgen. Sie lässt sich für einen Beobachtungsabstand d allgemein als

$$\sigma_d = \frac{\sum_{n=1}^i |x_{dn} - \bar{x}_d|}{\bar{x}_d \cdot i} \quad (4.4)$$

schreiben. Hierbei ist x_d die betrachtete lichttechnische Größe, i die Anzahl der untersuchten Flächengrößen bzw. Geometrien und \bar{x}_d das arithmetische Mittel der lichttechnischen Größe über alle untersuchten Geometrien. Im Falle der Beleuchtungsstärke E_μ am Auge ergibt sich für die 5 m Distanz eine Abweichung von $\sigma_{5m} = 0,21$ und für $d = 70m$ eine relative Differenz von $\sigma_{70m} = 0,55$. Für E_{Retina} können bei den gleichen Distanzen Werte von $\sigma_{5m} = 0,15$ und $\sigma_{70m} = 0,16$ ermittelt werden. Es zeigt sich somit für beide Entfernungen eine Verringerung der Abweichung, insbesondere jedoch für die Fernfelddistanz bei $d = 70m$. Dies kann auf die Korrektur des Pupillendurchmessers nach Gl. (4.2) zurückgeführt werden.

Zur einheitlichen Beschreibung des Helligkeitsempfindens aller untersuchten Szenarien wird das Modell im Folgenden durch die Berücksichtigung von Abbildungsfehlern im Sehapparat erweitert. Sichtbar werden diese z.B. durch eine Verwaschung der Kontrastkanten, was aus einer unscharfen Abbildung auf der Retina resultiert. Mathematisch können jene Effekte durch die Modulationsübertragungsfunktion (Modulation Transfer Function, MTF) berücksichtigt werden, die als Maß für den Kontrast der Abbildung verstanden werden kann [75].

Die Berechnung wird durch die Multiplikation des fouriertransformierten Bildes bzw. der transformierten OLED Leuchtflächen und der MTF umgesetzt¹⁰. Watson [108] entwickelte eine MTF für den Sehapparat und weiße achromatische Spektren¹¹, die er auf folgende Weise beschreibt:

$$MTF(u, D_u) = (1 + (\frac{u}{u_1(D_u)})^2)^{0,62} \cdot \sqrt{f(u, D_u, 555 \text{ nm})}. \quad (4.5)$$

Hierbei ist u die Ortsfrequenz. u_1 ergibt sich als Anpassungsfunktion und kann durch

$$u_1 = 21,95 - 5,512 \cdot D_u + 0,3922 \cdot D_u^2 \quad (4.6)$$

ausgedrückt werden. Die Modulationsübertragungsfunktion f für ein aberrations-freies System bei inkohärenter Strahlung wird mit

$$f(u, D_u, 555 \text{ nm}) = \frac{2}{\pi} (\cos^{-1}(\hat{u}) - \hat{u} \sqrt{1 - \hat{u}^2}). \quad (4.7)$$

und $\hat{u} = \frac{u \cdot 999}{\pi \cdot D_u \cdot 10^{13}}$ beschrieben. Zur mathematischen Vereinfachung wird die Auflösung für die Berechnungen so gewählt, dass ein Pixel ca. einem Millimeter des Heckleuchtenmusters entspricht.

Das Verwaschen der scharfen hell-dunkel Kontraste an den OLED Kanten geht mit einer Vergrößerung der beleuchteten Fläche auf der Retina einher, die für jede Leuchtflächengröße bzw. Geometrie unterschiedlich ausfällt. Aufgrund des unveränderten Lichtstroms Φ_{Retina} verringert sich somit die mittlere Beleuchtungs-

¹⁰Bei Naumann et al. [75] findet sich eine detaillierte Beschreibung der Modulationsübertragungsfunktion (Modulation Transfer Function, MTF) und ihren Anwendungsbereichen.

¹¹Trotz der Entwicklung der MTF für weiße achromatische Spektren, wird jene Funktion nach Watson [108] mangels Alternativen für rote (monochromatische) Spektren im Rahmen dieser Arbeit angewendet.

stärke auf der Retina. Diese wird im Folgenden als korrigierte Beleuchtungsstärke $E_{kor.Retina}$ bezeichnet.

Aus mathematischer Sicht fällt die Leuchtdichte an den Kanten der OLEDs bzw. Grenzen der Geometrien bis ins Unendliche ab. In der Praxis ist jedoch davon auszugehen, dass das Signal nur bis zu einem Schwellwert wahrgenommen wird. Die Leuchtdichteschwelle wird auf folgende Weise definiert:

$$\Delta L = \frac{L_{out}}{L}. \quad (4.8)$$

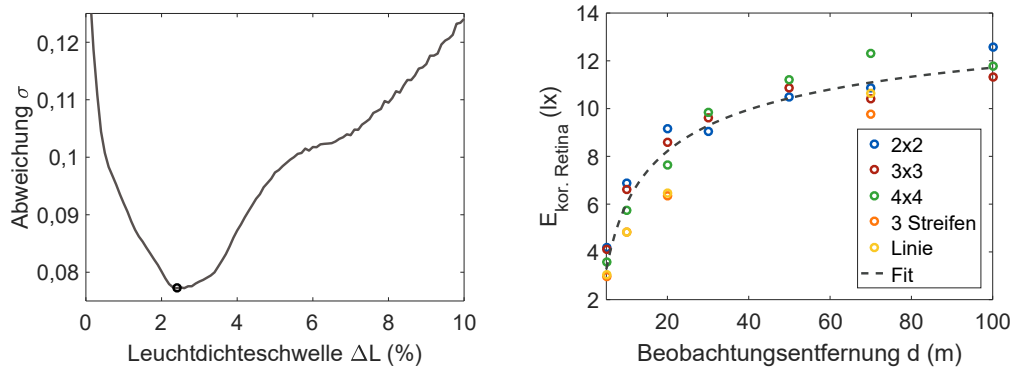
Hierbei ist L die mittlere Leuchtdichte des Heckleuchtenmusters und L_{out} die Leuchtdichte an der betrachteten Schwelle. Es schließt sich folgende Annahme an: Unter Berücksichtigung der Leuchtdichteschwelle ΔL gleichen sich die mittleren korrigierten Beleuchtungsstärken $E_{kor.Retina}$ für alle Flächengrößen und Geometrien, was eine einheitliche Beschreibung des Empfindens der optimalen Helligkeit für die unterschiedlichen dargebotenen Geometrien ermöglicht.

Zur Bestimmung von ΔL wird eine Minimalwertaufgabe entwickelt. Hierzu werden für verschiedene Schwellen die $E_{kor.Retina}$ Werte aller Flächengrößen bzw. Geometrien ermittelt und jeweils die mittleren relativen Abweichungen σ über alle Beobachtungsentfernungen gebildet:

$$\sigma = \frac{\sigma_{5m} + \sigma_{10m} + \sigma_{20m} + \sigma_{30m} + \sigma_{50m} + \sigma_{70m} + \sigma_{100m}}{7}. \quad (4.9)$$

σ wird im Folgenden für eine Leuchtdichteschwelle von 0% bis 10% in 0,1% Schritten berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 4.19a dargestellt. Es zeigt sich ein eindeutiges Minimum der relativen Abweichung bei $\Delta L = 2,4\%$. Mit $\sigma = 0,077$ liegt diese deutlich niedriger als die Vergleichswerte für E_{μ} und E_{Retina} (Faktor 2 bis Faktor 7) zuvor in diesem Kapitel.

Die mit $\Delta L = 2,4\%$ berechneten $E_{kor.Retina}$ Werte sind in Abb. 4.19b in Abhängigkeit des Beobachtungsabstandes d aufgetragen. Es ergeben sich mittlere Werte zwischen $3lx$ und $13lx$. Zur einheitlichen mathematischen Beschreibung des Kurvenverlaufes wird zusätzlich eine Ausgleichsfunktion zur Beschreibung der Datenpunkte ermittelt. Hierzu werden die Ergebnisse aus der Varianzanalyse nach Verfahren 1 berücksichtigt, welche den Schluss der Existenz eines Nah-



(a) Relative mittlere Abweichung σ über der Leuchtdichteschwelle ΔL [118], [117]. (b) Korrigierte Beleuchtungsstärke auf der Retina $E_{kor.Retina}$ in Abhängigkeit von d [118], [117].

Abbildung 4.19: Minimalwertaufgabe: Grafische Darstellung der relativen mittleren Abweichung σ über der Leuchtdichteschwelle ΔL . Der minimale Wert ergibt sich bei $\Delta L = 2,4\%$. Die auf Grundlage dieses Schwellwertes ermittelte korrigierte Beleuchtungsstärke auf der Retina $E_{kor.Retina}$ ist zusätzlich für alle untersuchten Flächengrößen und Geometrien inklusive Ausgleichsfunktion (vgl. Gl. (4.10)) aufgetragen [118], [117].

und Fernbereiches bei der Bewertung der optimalen Helligkeit zulassen. Die Ausgleichsfunktion sollte demnach sowohl die steigenden Werte im Nahbereich erfassen als auch mit zunehmender Entfernung einen Sättigungsverlauf zeigen. Hierfür eignet sich die Funktion

$$E_{kor.Retina} = a \cdot d^{-\frac{1}{3}} + 16,64 \text{ lx} \quad (4.10)$$

mit $a = -22,86 \text{ lx} \cdot \text{m}^{1/3}$. Das Bestimmtheitsmaß konnte zu $R^2 = 0,985$ ermittelt werden.

4.6.3 Untersuchung 3: Dynamische Signale

Überprüfung der Voraussetzungen

Im Falle von Untersuchung 3 kann für 3 von 12 (Jarque-Bera) bzw. 4 von 12 (Shapiro-Wilk) Szenarien Normalverteilung angenommen werden. Beide Tests lassen hierbei im Besonderen die Annahme nicht normalverteilter Stichproben für alle Szenarien bei einem Beobachtungsabstand von $d = 5 \text{ m}$ zu. Die Resultate der Überprüfung sind in Tab. 4.9 gesammelt. Trotz nicht normalverteilter Stich-

proben in Untersuchung 3 soll eine Varianzanalyse auf Grundlage der zuvor in Kapitel 4.5.2 geführten Diskussion und insbesondere aufgrund der Robustheit der ANOVA gegenüber leichter Verletzungen jener Voraussetzung durchgeführt werden.

Nach Prüfung auf Sphärizität wird für die Haupteffekte (Durchlaufdauer t :

Tabelle 4.9: Übersicht der Ergebnisse des Jarque-Bera und Shapiro-Wilk Tests für Untersuchung 3. Bis auf das Szenario bei $d = 20\text{ m}$, $t = 0,6\text{ s}$ (kursiv) gleichen sich die Resultate der beiden Tests.

Beobachtungsabstand d (m)	Durchlaufdauer t (s)	Normalverteilt nach	
		Jarque-Bera	Shapiro-Wilk
5	1,2	nein	nein
	0,9	nein	nein
	0,6	nein	nein
	0,3	nein	nein
20	1,2	ja	ja
	0,9	nein	nein
	0,6	<i>nein</i>	<i>ja</i>
	0,3	nein	nein
70	1,2	ja	ja
	0,9	nein	nein
	0,6	ja	ja
	0,3	nein	nein

$p = 0.032$, Beobachtungsabstand d : $p = 6,24 \cdot 10^{-5}$) bei der Durchführung der 2-faktoriellen ANOVA eine Korrektur des F-Wertes nach Greenhouse und Geisser vorgenommen. Im Falle der Interaktion der Haupteffekte ($p = 0,162$) wird von Sphärizität ausgegangen.

Überprüfung auf Interaktion der unabhängigen Variablen

Das Ergebnis der Varianzanalyse liefert für die unabhängigen Variablen Durchlaufdauer t und Beobachtungsabstand d eine signifikante Interaktion mit der Wahrscheinlichkeit von $p = 8,11 \cdot 10^{-5}$. Im Folgenden werden somit die einfachen Haupteffekte der unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable mittels ein-faktorieller ANOVAs untersucht.

Untersuchung der einfachen Haupteffekte (einfaktoriell)

Vor der Durchführung der Varianzanalysen wurde zunächst die Sphärizität für alle einfaktoriell untersuchten Bedingungen überprüft (Tab. 4.10). Während für den Parameter Beobachtungsentfernung d keine Korrektur der Statistik notwendig ist, sprechen die Resultate für den Parameter Durchlaufdauer t allesamt für eine Verletzung der Sphärizität. Dies wird bei der Varianzanalyse berücksichtigt (Korrektur nach Greenhouse und Geiser).

Tabelle 4.10: Ergebnisse der Prüfung auf Sphärizität nach Mauchly (einfache Haupteffekte) für Untersuchung 3. Für den Parameter Beobachtungsabstand d kann von Sphärizität ausgegangen werden, wohingegen im Falle des Parameters Durchlaufdauer t eine Korrektur notwendig ist.

Parameter	p aus Mauchly Test	Korrektur
$d = 5m$	0,355	nein
$d = 20m$	0,056	nein
$d = 70m$	0,051	nein
$t = 1,2s$	$1,52 \cdot 10^{-4}$	ja
$t = 0,9s$	$4,46 \cdot 10^{-3}$	ja
$t = 0,6s$	0,012	ja
$t = 0,3s$	0,044	ja

Die Ergebnisse der ANOVAs (Tab. 4.11) zeigen einen signifikanten Effekt der Durchlaufdauer t auf die bewertete optimale Helligkeit bei Beobachtungsabständen von $d = 5m$ und $d = 20m$, was nach Untersuchung 1 dem Nahbereich entspricht. Kein signifikanter Einfluss kann für die Fernfeld Distanz von $d = 70m$ festgestellt werden.

Wie bereits in Untersuchung 1 und 2 zeigen die Resultate der Varianzanalyse ebenfalls einen eindeutigen signifikanten Einfluss der Beobachtungsentfernung d auf die abhängige Variable.

Im Folgenden wird ein Vergleich der eingestellten Durchlaufdauern t für die Beobachtungsentfernungen von $d = 5m$ und $d = 20m$ durchgeführt (Tab. 4.12a). Aufgrund des nicht signifikanten Einflusses der Durchlaufdauer bei einer Distanz von $d = 70m$ wird jenes Szenario nicht weiter berücksichtigt. Die Resultate für die

Tabelle 4.11: Zusammenstellung der Ergebnisse aus den Varianzanalysen für Untersuchung 3. Bis auf einen Beobachtungsabstand von $d = 70m$ zeigt sich ein signifikanter Einfluss der Durchlaufdauer t auf die bewertete optimale Helligkeit. Für alle Darbietungszeiten kann ein signifikanter Effekt des Beobachtungsabstandes d auf die abhängige Variable festgestellt werden (*dargestellt sind die nach den Resultaten aus Tab. 4.10 korrigierten Ergebnisse nach Greenhouse und Geisser).

Parameter	p aus ANOVA	sig. Einfluss von t bzw. d
$d = 5m$	$1,19 \cdot 10^{-6}$	ja
$d = 20m$	$5,96 \cdot 10^{-4}$	ja
$d = 70m$	0,998	nein
$t = 1,2s$	$4,38 \cdot 10^{-9*}$	ja
$t = 0,9s$	$2,89 \cdot 10^{-7*}$	ja
$t = 0,6s$	$2,3 \cdot 10^{-7*}$	ja
$t = 0,3s$	$1,3 \cdot 10^{-9*}$	ja

Nahfelddistanzen lassen auf ein nicht lineares Verhalten der bewerteten optimalen Helligkeit gegenüber der Durchlaufdauer t innerhalb des untersuchten Bereiches schließen. Für $d = 5m$ kann zusammenfassend von zwei signifikant unterschiedlichen Bewertungen ausgegangen werden. Ein Wert resultiert aus den Bewertungen für $t = 1,2s$ und $t = 0,3s$. Die Bewertungen für beide Parameter zeigen jeweils signifikante Differenzen gegenüber den Bewertungen für $t = 0,9s$ und $t = 0,6s$, welche den zweiten Wert bilden. Die Bewertungen beider genannter Paare zeigen untereinander keine signifikante Differenz. Zur näheren Beurteilung wird im späteren Verlauf Auswerteverfahren 2 (siehe Beginn Kapitel 4.5) angewendet.

Die Resultate für $d = 20m$ sprechen ebenfalls für zwei unterschiedliche Bewertungen. In diesem Fall ist jedoch von einer Gruppierung der Parameter $t = 1,2s$, $t = 0,9s$ und $t = 0,6s$ gegenüber $t = 0,3s$ auszugehen. Lediglich der Vergleich zwischen $t = 0,3s$ und $t = 0,6s$ (kein signifikanter Unterschied) spricht gegen diese Einteilung.

Die Vergleiche der Bewertungen zwischen den einzelnen Beobachtungsabständen d wurden durchgängig als signifikant ermittelt, wie die Ergebnisse in Tab. 4.12b zeigen. Sie decken sich somit mit den bisherigen Resultaten aus Untersuchung 1 und Untersuchung 2.

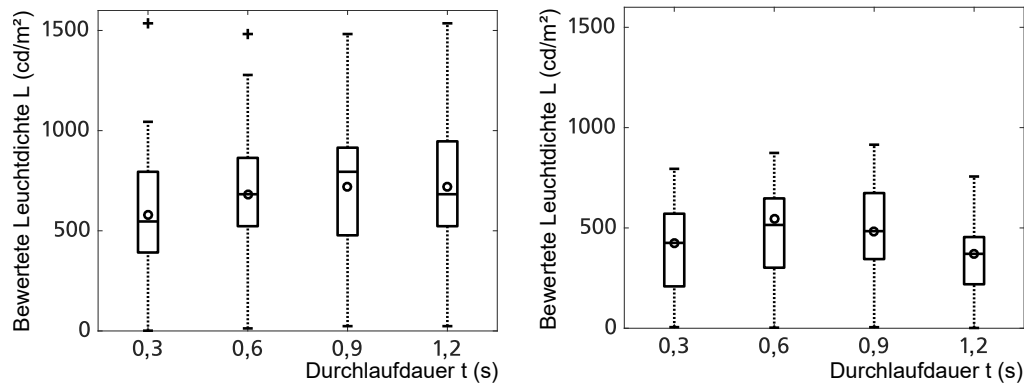
Tabelle 4.12: Zusammenfassung der Paarvergleiche für Untersuchung 3.

(a) Darstellung der Vergleiche zwischen den einzelnen Durchlaufauern t . Die Analyse für $d = 70\text{ m}$ wird aufgrund des nicht signifikanten Einflusses von t auf die abhängige Variable für jene Entfernung (vgl. Tab. 4.11) nicht berücksichtigt. Ein linearer Zusammenhang zwischen Durchlaufdauer t und der bewerteten optimalen Helligkeit ist nach den Resultaten nicht zu erwarten.

Paarvergleich		$d = 5\text{ m}$		$d = 20\text{ m}$	
$t_A\text{ (s)}$	$t_B\text{ (s)}$	p	sig. Diff.	p	sig. Diff.
1,2	0,9	$2,54 \cdot 10^{-4}$	ja	0,918	nein
1,2	0,6	$2,01 \cdot 10^{-4}$	ja	0,779	nein
1,2	0,3	0,749	nein	0,036	ja
0,9	0,6	0,998	nein	0,097	nein
0,9	0,3	0,021	ja	$2,56 \cdot 10^{-4}$	ja
0,6	0,3	$6,51 \cdot 10^{-4}$	ja	0,074	nein

(b) Auflistung der Paarvergleiche zwischen den verschiedenen, in Untersuchung 3 eingestellten, Beobachtungsabständen d . Für jedes Szenario zeigt sich eine signifikante Differenz.

Paarvergleich		$t = 1,2\text{ s}$		$t = 0,9\text{ s}$		$t = 0,6\text{ s}$		$t = 0,3\text{ s}$	
$d_A\text{ (m)}$	$d_B\text{ (m)}$	p	sig. Diff.	p	sig. Diff.	p	sig. Diff.	p	sig. Diff.
5	20	$6,54 \cdot 10^{-8}$	ja	$1,78 \cdot 10^{-6}$	ja	$7 \cdot 10^{-5}$	ja	$2,22 \cdot 10^{-5}$	ja
5	70	$2,7 \cdot 10^{-7}$	ja	$8,51 \cdot 10^{-6}$	ja	$4,37 \cdot 10^{-6}$	ja	$3,20 \cdot 10^{-8}$	ja
20	70	$2,75 \cdot 10^{-3}$	ja	0,032	ja	$2,59 \cdot 10^{-3}$	ja	$6 \cdot 10^{-4}$	ja



(a) Analyse der bewerteten Leuchtdichte L in (b) Veranschaulichung der bewerteten Leucht-
Abhängigkeit von der Durchlaufdauer t für dichte L in Abhängigkeit der Durchlaufdauer t
einen Beobachtungsabstand von $d = 20\text{ m}$ [122]. für $d = 5\text{ m}$ [122].

Abbildung 4.20: Darstellung der Daten nach Verfahren 1 für Untersuchung 3 in Form von Boxplots. Die Mediane L_{med} aus der Analyse nach Verfahren 1 sind als waagerechte Linien markiert. Zusätzlich sind die Mittelwerte L_{μ} nach Verfahren 2 als Kreise eingezeichnet [122].

Grafische Darstellung und Vergleich mit Verfahren 2¹²

Zunächst werden die Ergebnisse aus Untersuchung 3 grafisch in Form von Boxplots dargestellt. Abb. 4.20 zeigt die Resultate für die verschiedenen untersuchten Durchlaufzeiten t und die Beobachtungsabstände $d = 20\text{ m}$ und $d = 5\text{ m}$. Der Median L_{med} aus der Datenanalyse nach Verfahren 1 ist wie gewohnt als waagerechter Strich gekennzeichnet, wobei des Weiteren die untere und obere Begrenzung der Box das 25% bzw. 75% Perzentil anzeigt. Zum Vergleich sind in Abb. 4.20 zusätzlich die Mittelwerte L_{μ} nach Verfahren 2 als Kreise eingezeichnet. Ausreißer sind lediglich für $d = 20\text{ m}$ bei einer Durchlaufdauer von $t = 0,3\text{ s}$ und $t = 0,6\text{ s}$ zu beobachten. Die Werte für L_{med} und L_{μ} zeigen die größte Differenz für $d = 20\text{ m}$, $t = 0,9\text{ s}$. Hier weicht L_{μ} um 9,6% von L_{med} ab. Alle Ergebnisse für L_{med} und L_{μ} sind in Tab. 4.13 zusammengefasst.

Unter der Annahme, dass das dargebotene Signal den Schwinkel α durchläuft, kann aus der Durchlaufdauer t für jedes dargebotene Szenario eine Winkelgeschwindigkeit ω des Signals berechnet werden. Die in Tab. 4.13 zusammengefassten Werte für L_{μ} sind in Abb. 4.21 in Abhängigkeit von ω aufgetragen. Zusätzlich

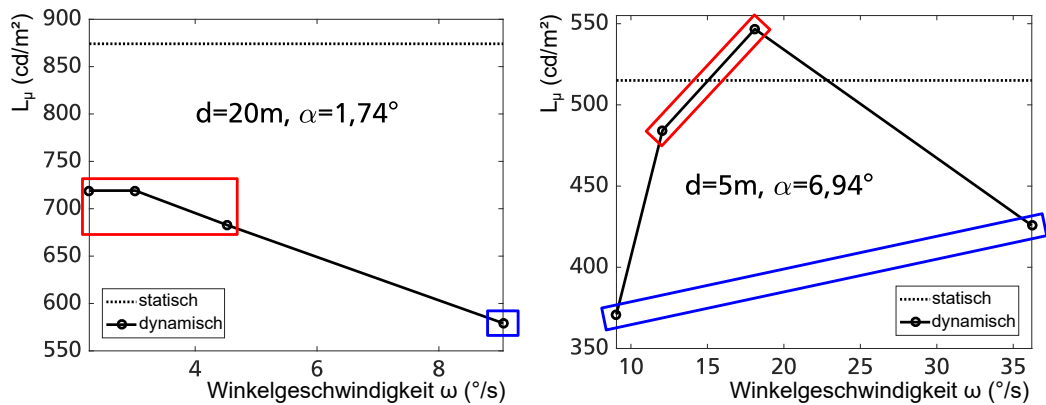
¹²Dieses Kapitel basiert auf einer vorherigen Publikation des Autors [122].

Tabelle 4.13: Zusammenfassung der medianen Leuchtdichten L_{med} nach Verfahren 1 und mittleren Leuchtdichten L_{μ} nach Verfahren 2 für die diversen Durchlaufzeiten t und die Beobachtungabstände $d = 20m$ und $d = 5m$. Die Resultate sind in Abb. 4.20 grafisch veranschaulicht [122].

d		$t = 1,2s$	$t = 0,9s$	$t = 0,6s$	$t = 0,3s$
5m	$L_{med} \left(\frac{cd}{m^2} \right)$	371	484	515	426
	$L_{\mu} \left(\frac{cd}{m^2} \right)$	371	484	547	426
20m	$L_{med} \left(\frac{cd}{m^2} \right)$	683	795	683	547
	$L_{\mu} \left(\frac{cd}{m^2} \right)$	719	719	683	579

ist zum Vergleich jeweils der statische Wert aus Untersuchung 1 ($A = 103,6 cm^2$) für $d = 20m$ und $d = 5m$ dargestellt. Die dynamischen Bewertungen aus Untersuchung 3 liegen bis auf den Wert bei $\omega = 18^\circ/s$ unterhalb der statischen Werte aus Untersuchung 1. Für das $d = 20m$ Szenario und somit einen Bereich zwischen $\omega = 2^\circ/s$ und $\omega = 9^\circ/s$ fällt die mittlere Leuchtdichte L_{μ} mit steigender Winkelgeschwindigkeit ω . Im Falle des $5m$ Szenarios kann hingegen ein Peak bei einer Winkelgeschwindigkeit von $\omega = 18^\circ/s$ festgestellt werden. Generell liegen die L_{μ} Werte für die $d = 20m$ Distanzen höher als jene für die $d = 5m$ Distanzen, was sich mit den Ergebnisse aus Untersuchung 1 deckt. Abb. 4.21 vergleicht zudem die L_{μ} Werte nach Verfahren 2 mit den Resultaten der Varianzanalyse nach Verfahren 1. Die blauen sowie roten Boxen verdeutlichen zusammengehörige Wertegruppen, als Interpretation aus den Paarvergleichen (vgl. Tab. 4.12).

Zur weiteren Aufschlüsselung der Daten soll analog zu den statischen Signalen die korrigierte Beleuchtungsstärke auf der Retina $E_{kor.Retina}$ berechnet werden (vgl. Kapitel 4.6.2). Mittels Linsengleichung für dünne Linsen kann nun ebenfalls die vom dynamischen Signal auf der Retina überstrichene Strecke ermittelt werden, woraus durch Berücksichtigung der Durchlaufdauer t die Signalgeschwindigkeit auf der Retina v_{Retina} berechnet werden kann. In Abb. 4.22 sind die ermittelten $E_{kor.Retina}$ Werte über v_{Retina} aufgetragen. Die Resultate werden hierbei sowohl mit den Ergebnissen für das statische Signal ($A = 103,6 cm^2$) aus Untersuchung 1 (grauer Kreis) als auch mit den theoretischen Werten für statische Signale nach Gl. (4.10) (gestrichelte Linien) verglichen. Analog zu den Abhängigkeiten in Abb. 4.21 kann im Falle der $20m$ Distanz ein nahezu linear fallender Verlauf von



(a) Darstellung von L_{μ} über der Winkelgeschwindigkeit ω für $d = 20m$. Der maximale Sehwinkel beträgt $\alpha = 1,74^{\circ}$. Nach [122].

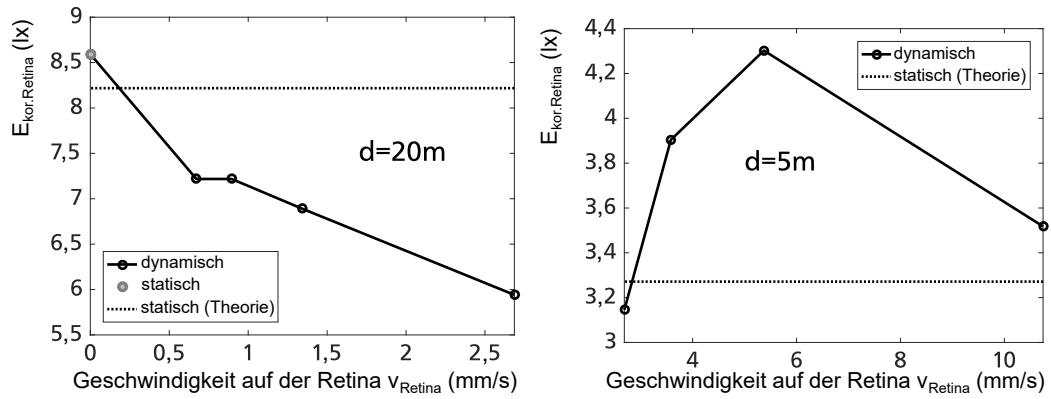
(b) Visualisierung der Beziehung von L_{μ} und ω für $d = 5m$. Es stellt sich ein maximaler Sehwinkel von $\alpha = 6,94^{\circ}$ ein. Nach [122].

Abbildung 4.21: Abhängigkeit der Leuchtdichte L_{μ} (nach Verfahren 2) von der Winkelgeschwindigkeit ω . Zusätzlich sind die statischen Werte aus Untersuchung 1 ($A = 103,6 cm^2$) eingezeichnet. Die blauen sowie roten Boxen umschließen die jeweils nach Verfahren 1 analysierten Wertegruppen. Nach einer vorherigen Publikation des Autors [122].

$E_{kor.Retina}$ mit steigender Geschwindigkeit v_{Retina} festgestellt werden. Die maximale Signalgeschwindigkeit für die 20m Distanz beträgt hierbei $2,7 mm/s$. Im Besonderen fällt auf, dass ebenso der Wert für das statische Signal aus Untersuchung 1 ($v_{Retina} = 0 mm/s$) diesem Verhalten folgt. Hierzu passt auch der theoretische Wert nach Gl. (4.10), der erwartungsgemäß oberhalb der dynamischen Werte liegt.

Für $d = 5m$ zeigt sich ein Peak im Verlauf bei $5,4 mm/s$ analog zu dem Verhalten des L_{μ} Wertes bei $\omega = 18^{\circ}/s$ (Abb.4.21). In diesem Fall liegt lediglich die kleinste Signalgeschwindigkeit von $v_{Retina} = 2,7 mm/s$ unterhalb des nach Gl. (4.10) ermittelten statischen Wertes.

Um die Datensätze für die 5m und 20m Distanz vergleichen zu können, müssen die unterschiedlichen Bewertungen der optimalen Helligkeit aufgrund der verschiedenen Beobachtungsabstände angepasst werden. Auch wenn Gl. (4.10) auf einem Modell für statische Signale beruht, soll sie an dieser Stelle Anwendung finden. Nach ihr kann zwischen den Distanzen ein Faktor zwischen den korrigier-



(a) $E_{kor.Retina}$ in Abhängigkeit von v_{Retina} für einen Beobachtungsabstand von $d = 20m$ [122]. (b) $E_{kor.Retina}$ in Abhängigkeit von v_{Retina} für einen Beobachtungsabstand von $d = 5m$ [122].

Abbildung 4.22: Grafische Darstellung der korrigierten Beleuchtungsstärke auf der Retina $E_{kor.Retina}$ in Abhängigkeit der Signalgeschwindigkeit auf der Retina v_{Retina} . Verglichen sind die dynamischen Ergebnisse mit den statischen Resultaten aus Studie und Theorie [122].

ten Beleuchtungsstärken auf der Retina gebildet werden:

$$k = \frac{E_{kor.Retina}(20m)}{E_{kor.Retina}(5m)} = 2,51. \quad (4.11)$$

Im Folgenden werden die Werte für die Beobachtungsentfernung $d = 5m$ mit dem Faktor k multipliziert. Abschließend werden alle Werte auf den statischen Wert der $20m$ Distanz normiert (Abb. 4.22a, grauer Kreis). Das Resultat der Operation ist in Abb. 4.23 in Form der normierten $\epsilon_{kor.Retina}$ Werte dargestellt.

Es zeigt sich, dass durch die vorgenommene Anpassung kein Anschluss der $20m$ und $5m$ Datensätze für die Signalgeschwindigkeit $v_{Retina} = 2,7mm/s$ hergestellt werden kann. Dies mag zum einen in der Korrektur durch ein auf statischen Daten basierendes Modell begründet liegen. Vielmehr sollte berücksichtigt werden, dass im Falle von $d = 20m$ und $\alpha = 1,74^\circ$ von einer fovealen Belichtung der Retina (hohe Zapfendichte, sehr geringe Stäbchendichte) auszugehen ist, wohingegen für die $5m$ Distanz und einem Sehwinkel von $\alpha = 6,94^\circ$ der Beitrag der Stäbchen auf der Retina nicht weiter vernachlässigt werden kann (vgl. [99]). Diese Tatsache mag ebenso eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen Kurvenverläufe der $d = 20m$ und $d = 5m$ Daten liefern.

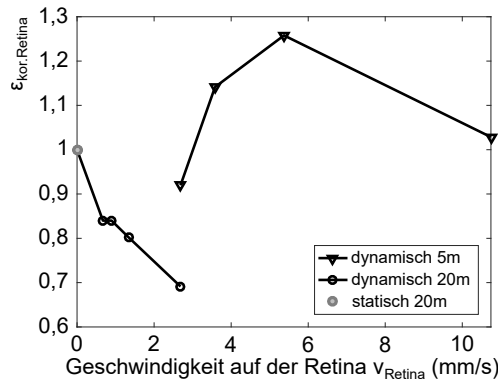


Abbildung 4.23: Darstellung der normierten Werte der korrigierten Beleuchtungsstärke auf der Retina $\epsilon_{kor.Retina}$ in Abhängigkeit der Signalgeschwindigkeit auf der Netzhaut v_{Retina} . Eingezeichnet sind die Resultate aus Untersuchung 3 für $d = 20m$ und $d = 5m$ (dynamisch) sowie zum Vergleich das Ergebnis aus Untersuchung 1 für $d = 20m$ (statisch) [122].

4.7 Fazit und Einordnung in die Literatur

Im Folgenden werden die elementaren Resultate dieses Kapitels zusammengefasst und mit den Ergebnissen aus der Literatur verglichen.

4.7.1 Einfluss des Beobachtungsabstandes d

Nach den durchgeführten Analysen kann von einem Einfluss des Beobachtungsabstandes auf die optimale Helligkeit von Schlussleuchten ausgegangen werden. Dies wird sowohl durch Analyseverfahren 1 bzw. die Varianzanalysen der 3 Untersuchungen gestützt als auch durch Analyseverfahren 2 untermauert. Deutlich wird das Verhalten z.B. in Abb. 4.16. Auf Grundlage der Varianzanalysen (vgl. insbesondere Tab. 4.5) und der L_μ Werte ist zudem von einem Nahfeldbereich und einem Fernfeldbereich auszugehen. L_μ steigt im Nahfeldbereich mit der Beobachtungsentfernung d an, wohingegen die Leuchtdichtewerte im Fernfeld nahezu konstant bleiben. Die Grenzentfernung des Nahbereiches beträgt hierbei ca. $d > 30m$.

Es konnte demnach aus den Untersuchungen ein Anstieg der optimalen Leuchtdichte L_μ mit dem Beobachtungsabstand analysiert werden. Dieses Resultat deckt

sich mit den Ergebnissen von Armbruster [11], Polin und Khanh [80], Schmidt-Clausen [89], [90] und Zandi et al. [114]. Zusätzlich wurde die Existenz eines Nah- und Fernfeldbereiches festgestellt. Eine adaptive Anpassung der Leuchtdichte der Fahrzeugschlussleuchte ist daher innerhalb von geringen Distanzen bis $d = 30\text{m}$ sinnvoll. Darüber hinaus kann eine konstante Leuchtdichte empfohlen werden.

4.7.2 Einfluss der Leuchtflächengröße und Geometrie

Ein Einfluss der Leuchtflächengröße auf die optimale Helligkeit einer Schlussleuchte kann sowohl aus der Varianzanalyse zu Untersuchung 1 als auch den ermittelten L_μ Werten nach Verfahren 2 (siehe Abb. 4.16a) entnommen werden. Hierbei ist mit steigender Leuchtfläche eine Entwicklung zu sinkenden L_μ Werten zu erkennen. Die Analyse deckt sich somit mit den Resultaten von Mortimer [73] und Schmidt-Clausen [89].

Für die zwei untersuchten Geometrien Streifen und Linie konnte ebenso mittels ANOVA ein signifikanter Einfluss auf die bewertete Helligkeit des Schlusslichtes ermittelt werden, was die Arbeiten von Zandi et al. [114] bestätigt. Die L_μ Werte für die Geometrie Linie lagen hierbei oberhalb jener der mehrteiligen Geometrie Streifen (siehe Abb. 4.16a).

Durch die Berücksichtigung optischer Effekte im Auge mittels MTF konnte durch die Einführung der korrigierten Beleuchtungsstärke auf der Retina $E_{kor.Retina}$ eine einheitliche theoretische Beschreibung des Helligkeitsempfindens hergeleitet werden. $E_{kor.Retina}$ hängt demnach nach Gl. (4.10) nicht von der Flächengröße bzw. der Geometrie der Leuchte ab.

Auf der Grundlage von Gl. (4.10) kann somit bei der Entwicklung und lichttechnischen Auslegung von Schlussleuchten auf die optimale Leuchtdichte jedweder Geometrie durch Anwendung des vorgestellten Verfahrens zurück gerechnet werden.

4.7.3 Einfluss der Winkelgeschwindigkeit ω

Im Falle der Untersuchungen der dynamischen Signale konnte im Nahfeldbereich ein klarer Einfluss der Winkelgeschwindigkeit ω auf die optimale Helligkeit eines

Schlusslichtes festgestellt werden. Dies bestätigen die Auswertungen nach Verfahren 1 (Varianzanalyse) und die Ermittlung der L_μ Werte (vgl. Abb. 4.21). Für die Fernfelddistanz hingegen war kein signifikanter Einfluss von ω auf die optimale Helligkeit festzustellen. Bei fovealer Belichtung kann mit steigender Winkelgeschwindigkeit ein nahezu linearer Abfall der Leuchtdichte L_μ mit steigender Winkelgeschwindigkeit ω beobachtet werden. Bei nicht fovealer Belichtung konnte ein nicht lineares Verhalten festgestellt werden. Jene Abhängigkeit kann analog zu den Ergebnissen von Chawla et al. [26], [25] als „invertiertes U“ beschrieben werden.

Auf Grundlage der Ergebnisse wird für die Auslegung der optimalen Leuchtdichte zukünftiger dynamischer Schlusslichtfunktionen eine Berücksichtigung der Signalgeschwindigkeit empfohlen. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere im Nahbereich auf eine adaptive Anpassung der Leuchtdichte in Abhängigkeit der Signalwinkelgeschwindigkeit ω geachtet werden sollte.

4.7.4 Ermittelte optimale Leuchtdichten

Die aus den Untersuchungen 1 und 2 ermittelten optimalen Leuchtdichten L_μ für alle Flächengrößen und Geometrien sind in Abhängigkeit der Beobachtungsentfernung d in Abb. 4.16a dargestellt. Die mittleren optimalen Leuchtdichten L_μ für die Fernfelddistanzen $d > 30\text{m}$ liegen hierbei zwischen 864cd/m^2 und 1430cd/m^2 . Abb. 4.24 zeigt den ermittelten Bereich im Vergleich zu den Ergebnissen weiterer Feldstudien bei nächtlichen Bedingungen¹³ (vgl. Tab. 3.2) sowie dem beispielhaft berechneten „UNECE Leuchtdichtekorridor“ nach Abb. 2.4. Die Werte der eigenen Untersuchungen liegen hierbei innerhalb des UNECE Intervalls. Überschneidungen bestehen ebenfalls mit den Intervallen aus den Untersuchungen von Schmidt-Clausen [89], [90]. Keine Schnittmenge ergibt sich hingegen mit den Werten nach Mortimer [73], Armbruster [11] und Ripperger [83]. Der Maximalwert nach Mortimer [73] liegt gar um das 13-fache höher als jener aus den Untersuchungen dieser Arbeit. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die abweichenden Testbedingungen während der aufgeführten Studien eine Vergleich-

¹³Die Leuchtdichteintervalle nach Mortimer [73] und Schmidt-Clausen [89], [90] sind aus den angegebenen Lichtstärkewerten und untersuchten Flächengrößen nach Tab. 3.2 berechnet.

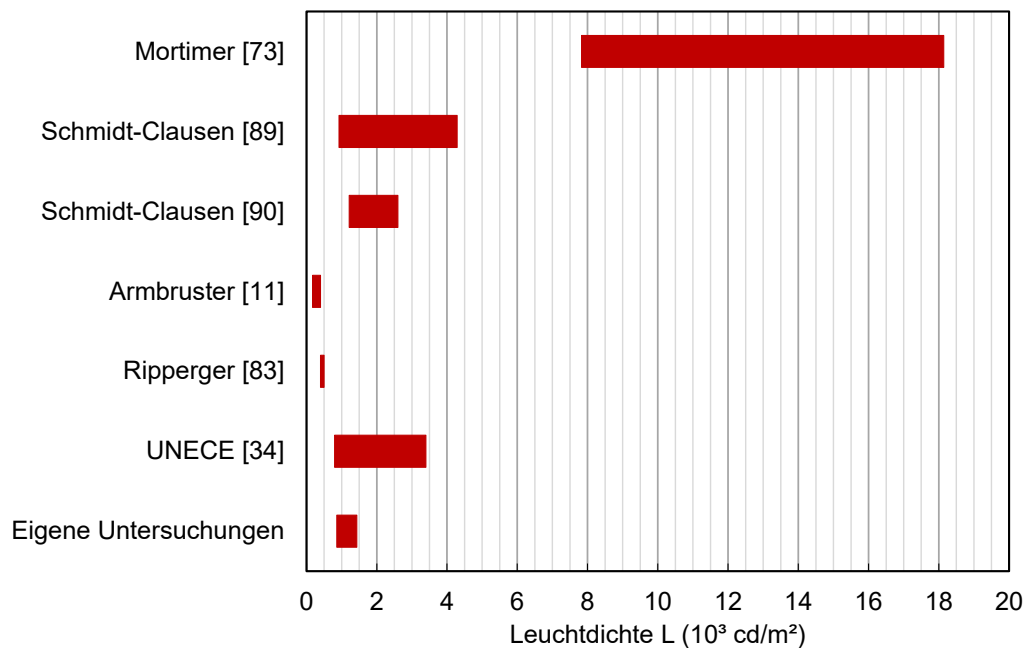


Abbildung 4.24: Vergleich des im Rahmen dieser Arbeit ermittelten optimalen Leuchtdichteintervalls für homogene Schlussleuchten mit den Empfehlungen aus weiteren Forschungsarbeiten sowie dem „UNECE Leuchtdichtekorridor“ nach Abb. 2.4. Die Werte eigener Untersuchungen liegen innerhalb des UNECE Intervalls. Übereinstimmungen gibt es auch mit den Ergebnissen von Schmidt-Clausen [89], [90]. Bis zu Faktor 13 trennen die Empfehlungen aus dieser Arbeit und jene von Mortimer [73].

barkeit der Daten erschweren. Hier ist insbesondere die unterschiedliche Wahl der Modellleuchten, Umgebungsleuchtdichten sowie Testverfahren zu nennen.

Durch die Wahl praxisnaher Leuchtflächengrößen und Geometrien für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit kann eine generelle Anwendung des ermittelten Leuchtdichteintervalls im Falle homogener Schlussleuchten und insbesondere OLED Schlussleuchten unter nächtlichen Bedingungen und $d > 30m$ empfohlen werden. Für geringere Distanzen ist eine adaptive Anpassungen der Leuchtdichte nach Abb. 4.16a ratsam.

Die als optimal bewertete Leuchtdichte L_μ des dynamischen Signales liegt unterhalb des vergleichbaren statischen Signales. Bis auf eine Ausnahme: Bei einer Winkelgeschwindigkeit von $\omega = 18^\circ/s$, was auf der Retina einer Signalgeschwindigkeit von $5,4mm/s$ entspricht, liegt L_μ des dynamischen Signales oberhalb des

Wertes des statischen Pendants (vgl. Abb. 4.21). Bei der Auslegung von zukünftigen dynamischen Schlussleuchten sollten Winkelgeschwindigkeiten in diesem Bereich daher vermieden werden.

5 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

Final werden zunächst die Forschungshypothesen diskutiert bzw. falsifiziert oder verifiziert. Auf Grundlage der Resultate aus den Untersuchungen zur optimalen Helligkeit homogener Schlussleuchten (Kapitel 4) werden die Hypothesen konkretisiert und in Lehrsätze umformuliert.

Desweiteren werden elementare Ergebnisse der Arbeit abseits der zentralen Forschungsfragen aufgeführt und ein Ausblick zu möglichen weiteren Forschungsvorhaben auf Basis dieser Arbeit gegeben.

5.1 Finale Diskussion der Forschungshypothesen

In Kapitel 3.3 wurden die folgenden Forschungshypothesen aufgestellt:

1. *Die als optimal wahrgenommene Helligkeit für ein Schlusslicht steigt mit dem Beobachtungsabstand zur Heckleuchte.*
2. *Mit steigender Leuchtfläche nimmt die als optimal wahrgenommene Leuchtdichte für ein Schlusslicht ab.*
3. *Die Leuchtflächengeometrie beeinflusst die Wahrnehmung der optimalen Helligkeit eines Schlusslichtes.*
4. *Die optimale Helligkeit eines dynamischen Schlusslichtes liegt unterhalb jener eines Statischen. Die Abhängigkeit zwischen Signalgeschwindigkeit und optimaler Helligkeit ist hierbei nicht linear.*

Auf Grundlage der Resultate dieser Arbeit können die Hypothesen 1-3 verifiziert und zu folgenden Lehrsätzen erweitert bzw. konkretisiert werden:

1. *Die als optimal wahrgenommene Leuchtdichte eines Schlusslichtes steigt mit dem Beobachtungsabstand zur Heckleuchte. Hierbei kann in zwei Bereiche unterschiedlicher Wahrnehmung differenziert werden: Den Nahbereich und den Fernbereich. Im Nahbereich wächst die optimale Leuchtdichte rapide mit dem Beobachtungsabstand an. Er erstreckt sich bis ca. 30m. Darüber hinaus, im Fernbereich, ändert sich die optimale Leuchtdichte mit dem Beobachtungsabstand nur geringfügig.*
2. *Im Falle gleicher Geometrien nimmt mit steigender Leuchtfläche die als optimal wahrgenommene Leuchtdichte für ein Schlusslicht ab.*
3. *Die Leuchtflächengeometrie beeinflusst die Wahrnehmung der optimalen Helligkeit eines Schlusslichtes.*

Auf Basis der Ergebnisse aus der Modellbildung in Kapitel 4.6.2 kann zudem folgende Ergänzung zu den Sätzen 1-3 formuliert werden:

Durch die korrigierten Beleuchtungsstärke auf der Retina $E_{kor.Retina}$ kann das Empfinden der optimalen Helligkeit für ein Schlusslicht unabhängig von der Leuchtflächengeometrie und Leuchtflächengröße beschrieben werden. In Abhängigkeit des Beobachtungsabstandes d besteht folgende Beziehung:

$$E_{kor.Retina} = a \cdot d^{-\frac{1}{3}} + 16,64 \text{ lx mit } a = -22,86 \text{ lx} \cdot \text{m}^{1/3}.$$

Hypothese 4 wird aufgrund der Tatsache, dass die Untersuchungen für das dynamische Signal bei einer Winkelgeschwindigkeit von $18^\circ/\text{s}$ höhere Werte für die optimale Leuchtdichte ergeben als im Falle des statischen Signales falsifiziert. Außerhalb des genannten Geschwindigkeitsbereiches trifft die Aussage aus Hypothese 4 jedoch zu. Daher kann folgender 4. Lehrsatz verfasst werden:

4. *Bei Winkelgeschwindigkeiten im Bereich von $18^\circ/\text{s}$ liegt die optimale Leuchtdichte eines dynamischen Schlusslichtes oberhalb jener des statischen Pendants. Außerhalb dieses Bereiches liegt sie unterhalb. Im Falle fovealer Be-
lichtung der Retina sinkt die optimale Leuchtdichte mit der Signalgeschwin-*

digkeit nahezu linear. Für nicht foveale Belichtung zeigt sich ein nicht linearer Verlauf, der in seiner Charakteristik als „invertiertes U“ (vgl. [26], [25]) beschrieben werden kann.

5.2 Weitere elementare Ergebnisse der Arbeit

Anhand der Häufigkeitsverteilungen nach Auswerteverfahren 2 konnten aus Kapitel 4.6.1 (vgl. Abb. 4.14) Rückschlüsse auf die geeignete photometrische Größe zur Entwicklung von Fahrzeugschlussleuchten gezogen werden:

Bei der lichttechnischen Auslegung von Fahrzeugschlussleuchten ist die Leuchtdichte als photometrische Größe gegenüber der Lichtstärke zu bevorzugen. Insbesondere im Fernbereich ($d > 30\text{m}$) ist die Leuchtdichte zur quantitativen Beschreibung der Schlusslichthelligkeit besser geeignet.

Des Weiteren lassen die analysierten Abhängigkeiten der optimalen Leuchtdichte eines Schlusslichtes vom Sehwinkel in Kapitel 4.6.2 folgende Annahme zu (vgl. Abb. 4.17):

Eine Simulation der theoretischen Beobachtungsentfernung durch die ausschließliche Variation des Sehwinkels bzw. der Signalgröße in experimentellen Studien führt zu Abweichungen in den Bewertungen der optimalen Leuchtdichte gegenüber Versuchen mit real dargestellten Distanzen.

5.3 Mögliches weiteres Vorgehen

Durch die systematische Untersuchung der Auswirkung der Variablen

- *Beobachtungsabstand*
- *Leuchtflächengröße*
- *Leuchtflächengeometrie und*
- *Winkelgeschwindigkeit*

auf die optimale Helligkeit von Schlussleuchten wurden sowohl die gegenwärtig für die Auslegung eines Schlusslichtes entscheidenden Parameter untersucht als auch Einflüsse auf die Wahrnehmung zukünftiger dynamischer Heckleuchtfunktionen erforscht.

Durch die gewählten experimentellen Bedingungen während der Untersuchungen konnten Störeinflüsse minimiert werden. Durch die gezielte Untersuchung der Parameter ohne Störeinflüsse können die Ergebnisse dieser Arbeit hingegen die Auswirkungen genau jener auf die Wahrnehmung der optimalen Helligkeit nicht klären. Hier eröffnet sich ein weites Forschungsfeld. Ebenso bleiben die Einflüsse weiterer Variablen wie

- *Umfeldleuchtdichte*
- *Abblendlicht im Vorfeld*
- *Fahrbahnmarkierungen*
- *Gegenverkehr*
- *Personen im Sichtfeld* etc.

im Rahmen dieser Arbeit ungeklärt.

Für mögliche zukünftige Forschungsarbeiten empfiehlt sich zur Untersuchung der Wirkungsweise jener vorgenannten Variablen auf die Wahrnehmung der optimalen Helligkeit ein schrittweises Vorgehen. Hierbei sollte zur Vergleichbarkeit insbesondere auf einen ähnlichen experimentellen Aufbau sowie eine ähnliche Methodik geachtet werden. Studien im dynamischen Fahrbetrieb empfehlen sich aus Sicht des Autors erst nach grundlegender Untersuchung aller Variablen im statischen Feldtest.

Literatur

- [1] *DMS 401TM for OLED – Hardware description*, Autronic-Melchers GmbH (2002), Rev. 01.
- [2] *Leica DistoTM D3a BT – Gebrauchsanweisung*, Leica Geosystems AG, Heerbrugg (2010).
- [3] *MY9941 – 4 Channels Constant Current LED Driver with Cascade DMX512 Protocol and Differential Interface*, MY-Semi Inc. (2012).
- [4] *Colour & Vision Research laboratory database*, <http://www.cvrl.org> (2016), Stand: 29.07.2016.
- [5] *Colour & Vision Research laboratory database*, <http://www.cvrl.org> (2016), Stand: 10.12.2016.
- [6] *BTS256-E*, Gigahertz-Optik GmbH (o. J.).
- [7] *Video Photometer LMK – Ortsaufgelöste Licht- und Farbmessstechnik*, TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH (o. J.).
- [8] Adrian, W.: *Change of Visual Acuity with Age*, in *40 Jahre Lichttechnik Darmstadt 1956-1996*, S. 19–33 (1996).
- [9] Albou, P.; Boilevin, A.: *Adaptive Intelligent Rear Lamp System*, in *Proceedings of VISION 2016 – Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving*, Bd. 4, Société des Ingénieurs de l'Automobile (SIA), Paris, Frankreich (2016).

-
- [10] Armbruster, D.: *Motor vehicle signal lamps in a fog environment*, in *Proceedings of Progress in Automobile Lighting (PAL)* (Schmidt-Clausen, H.-J., Hg.), Bd. 8 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 23–27, Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München (2001).
- [11] Armbruster, D.: *Optimierung der visuellen Informationsübermittlung*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt (2001).
- [12] Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: *Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 14 Aufl. (2016).
- [13] Baldock, M. R. J.; Long, A. D.; Lindsay, V. L.; McLean, A. J.: *Rear End Crashes*, Techn. Ber. CASR018, Centre for Automotive Safety Research, The University of Adelaide (2005).
- [14] Bechert, H.; Wehlus, T.; Wittmann, S.; Brabec, C.: *Flexible and highly segmented OLED for automotive applications*, in *Proceedings of SPIE – Organic Electronics and Photonics: Fundamentals and Devices* (Reineke, S.; Vandewal, K., Hg.), Bd. 10687, Straßburg, Frankreich (2018).
- [15] Bera, A. K.; Jarque, C. M.: *Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals: Monte Carlo Evidence*, *Economics Letters* **7**(4), S. 313–318 (1981).
- [16] Bernanose, A.; Comte, M.; Vouaux, P.: *Sur un nouveau mode d’émission lumineuse chez certains composés organiques*, *J. Chim. Phys.* **50**, S. 64–68 (1953).
- [17] Blanca, M. J.; Alarcón, R.; Arnau, J.; Bono, R.; Bendayan, R.: *Effect of variance ratio on ANOVA robustness: Might 1.5 be the limit?*, *Behavior Research Methods* **50**(3), S. 937–962 (2018).
- [18] Boettner, E. A.; Reimer, W. J.: *Transmission of the ocular media*, *Invest. Ophthalmol. Visual Sci.* **1**(6), S. 776–783 (1962).

-
- [19] Bortz, J.; Döring, N.: *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*, Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 4 Aufl. (2006).
- [20] Bortz, J.; Lienert, G. A.: *Kurzgefasste Statistik für die klinische Forschung – Leitfaden für die verteilungsfreie Analyse kleiner Stichproben*, Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 3 Aufl. (2008).
- [21] Bortz, J.; Schuster, C.: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 7 Aufl. (2010).
- [22] Box, G. E. P.: *Non-Normality and Tests on Variances*, *Biometrika* **40**(3-4), S. 318–335 (1953).
- [23] Bullough, J. D.; Derlofske, J. V.; Kleinkes, M.: *Rear Signal Lighting: From Research to Standards, Now and in the Future*, SAE Technical Paper Series **2007-01-1229** (2007).
- [24] Burrows, P. E.; Bulovic, V.; Forrest, S. R.; Sapochak, L. S.; McCarty, D. M.; Thompson, M. E.: *Reliability and degradation of organic light emitting devices*, *Applied Physics Letters* **65**(23), S. 2922–2924 (1994).
- [25] Chawla, D.; Büchel, C.; Edwards, R. J.; Howseman, A.; Josephs, O.; Ashburner, J.; Friston, K. J.: *Speed-Dependent Responses in V5: A Replication Study*, *NeuroImage* **9**, S. 508–515 (1999).
- [26] Chawla, D.; Phillips, J.; Büchel, C.; Edwards, R.; Friston, K.: *Speed-Dependent Motion-Sensitive Responses in V5: An fMRI Study*, *NeuroImage* **7**(2), S. 86–96 (1998).
- [27] Cohen, J.: *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 2 Aufl. (1988).
- [28] Cole, B. L.; Brown, B.: *Specification of Road Traffic Signal Light Intensity*, *Human Factors* **10**(3), S. 245–254 (1968).
- [29] Custódio, A.; Trigo, D.: *Luminance homogeneity analysis of rear lamps by image processing: Rendering vs digital photography*, in *Proceedings of*

- the 17th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 17 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 461–470, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2017).
- [30] Diekmann, K.: *Temperaturbeständige OLED für Rückleuchten*, Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) **115**(4), S. 286–289 (2013).
- [31] DIN 5031-3: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik*, Beuth Verlag (1982).
- [32] Dubosc, C.: *Lighting systems and Show Cars*, in *Proceedings of Progress in Automobile Lighting (PAL)* (Schmidt-Clausen, H.-J., Hg.), Bd. 8 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 206–223, Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München (2001).
- [33] Dworzak, M.: *OLED as automotive light source*, in *Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 15 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 209–214, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2013).
- [34] Economic Commission for Europe of the United Nations: *Uniform provisions concerning the approval of front and rear position lamps, stop-lamps and end-outline marker lamps for motor vehicles (except motor cycles) and their trailers, Addendum 6: Regulation No. 7, Revision 6* (2012).
- [35] Economic Commission for Europe of the United Nations: *Uniform provisions concerning the approval of direction indicators for power-driven vehicles and their trailers, Addendum 5: Regulation No. 6, Revision 6* (2014).
- [36] Economic Commission for Europe of the United Nations: *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices, Addendum 47: Regulation No. 48, Revision 12* (2014).
- [37] Frischeisen, J.: *Light extraction in organic light-emitting diodes*, Dissertation, Universität Augsburg (2011).

-
- [38] Funke, C.: *Blendungsbewertung von LED-Leuchten in Innenräumen*, D, Technische Universität Ilmenau (2017).
- [39] Ghasemi, A.; Zahediasl, S.: *Normality Tests for Statistical Analysis: A Guide for Non-Statisticians*, International Journal of Endocrinology and Metabolism **10**(2), S. 486–489 (2012).
- [40] Gocke, T.: *Objektivierter Homogenitätsbewertung des Erscheinungsbildes automobiler Signalleuchten*, Dissertation, Technische Universität Ilmenau (2013).
- [41] Gramberg-Danielsen, B.: *Der Dunkelheitsunfall*, Enke, Stuttgart (1984).
- [42] Greenhouse, S. W.; Geisser, S.: *On Methods in the Analysis of Profile Data*, Psychometrika **24**(2), S. 95–112 (1959).
- [43] Gut, C.: *Laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (2017).
- [44] Hagemann, M.; Brinkmann, M.; Bonrad, K.; Voges, F.; Ruths, T.; Bluhm, M.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Kudaev, S.; Sinzinger, S.: *OLED for Automotive Lighting*, in *Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 12 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 550–557, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2007).
- [45] Hamm, M.: *Safety Improvement Generated by Pioneering New Matrix and Direction Indicator Functionalities*, in *Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 15 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 310–320, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2013).
- [46] Hofmann, S.; Thomschke, M.; Lüssem, B.; Leo, K.: *Top-emitting organic light-emitting diodes*, Opt. Express **19**(S6), S. A1250–A1264 (2011).
- [47] Huynh, H.; Feldt, L. S.: *Estimation of the Box Correction for Degrees of Freedom from Sample Data in Randomized Block and Split-Plot Designs*, Journal of Educational Statistics **1**(1), S. 69–82 (1976).

-
- [48] Ishihara, S.: *Ishihara's Tests for Colour Deficiency, 38 Plates*, Kanehara & Co., Ltd., Tokio (1988).
- [49] Janssen, J.; Laatz, W.: *Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 6 Aufl. (2007).
- [50] Jarque, C. M.; Bera, A. K.: *Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals*, Economics Letters **6**(3), S. 255–259 (1980).
- [51] Jobst, T.; Küpper, L.; Lüttgens, G.: *OLED for automotive signalling applications*, in *Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 15 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 205–208, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2013).
- [52] Kaltenbach, A.: *Daylight simulation for the evaluation of rear lamps*, in *Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 12 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 396–401, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2007).
- [53] Kaltenbach, A.: *Entwicklung einer inintelligent Heckleuchte zur adaptiven Anpassung der Lichtsignale an variable Sichtbedingungen*, Dissertation, Technische Universität Ilmenau (2009).
- [54] Kaltenbach, A.: *Intelligent tail lamps – requirements and benefit of adaptive signal lights*, in *Proceedings of the 8th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 13 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 183–189, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2009).
- [55] Kashefy, H.: *Dynamic Traffic Light, Vehicle Signalling Display*, SAE Technical Paper Series **980560** (1998).
- [56] Kleinkes, M.; Pohlmann, W.: *OLED – Innovative Graphics and Future Possibilities*, in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 16 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 261–266, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2015).

- [57] Kleinkes, M.; Schmidt, C.; Mügge, M.; Hohmann, C.: *Sicherheit und Design künftiger Heckleuchten*, Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) **114**(1), S. 70–75 (2012).
- [58] Köth, K.: *Auslegung der Kraftfahrzeugbeleuchtung hinsichtlich Sicht und Signalisation*, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH) (2009).
- [59] Kraus, A.; Benter, N.; Börner, H.: *OLED Technology in Automotive Applications*, in *Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 12 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 558–566, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2007).
- [60] Kropac, M.; Kubena, V.: *Styling challenges of OLED in automotive exterior lighting*, in *Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 15 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 215–218, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2013).
- [61] Kruppa, M.; Werner, T.: *An OLED Taillight Revolution – From Point Light Sources to Area Light Sources*, *Ingénieurs de l’Auto* **857**, S. 106–109 (2018).
- [62] Lin, C.-L.; Lin, H.-W.; Wu, C.: *Examining microcavity organic light-emitting devices having two metal mirrors*, *Applied Physics Letters* **87**(2), S. 021101–021101 (2005).
- [63] Lüpsen, H.: *Skript: Varianzanalysen – Prüfen der Voraussetzungen und nichtparametrische Methoden sowie praktische Anwendungen mit R und SPSS*, Version 3.1.1, Regionales Rechenzentrum (RRZK), Universität zu Köln (2018).
- [64] MacAdam, D. L.: *Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight*, *J. Opt. Soc. Am.* **32**(5), S. 247–274 (1942).
- [65] MacAdam, D. L.: *Specification of Small Chromaticity Differences*, *J. Opt. Soc. Am.* **33**(1), S. 18–26 (1943).

-
- [66] Marcori, F.; Antonipieri, M.; Padovani, S.; Filipuzzi, A.; Ricerche, C.: *Intelligent light Management for OLED on foil Applications (IMOLA): Automotive rear light demonstrator*, in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 16 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 293–300, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2015).
- [67] Mauchly, J. W.: *Significance Test for Sphericity of a Normal n -Variate Distribution*, Ann. Math. Statist. **11**(2), S. 204–209 (1940).
- [68] Mennig, I.; Rosenhammer, S.; Krems, J. F.: *Potential of Innovative Tail Lamps to Prevent Accidents*, in *VDI-Berichte 2278 – Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*, S. 147–158, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2016).
- [69] Mennig, I. M.: *Information und Interaktion – Die Ermittlung von sicherheitsrelevanten Anforderungen an innovative Heckleuchten*, Dissertation, Technische Universität Chemnitz (2018).
- [70] Michenfelder, S.: *Konzeption, Realisierung und Verifikation eines automobilen Forschungsscheinwerfers auf Basis von Digitalprojektoren*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (2015).
- [71] Mócko, W.; Kaźmierczak, P.; Łukasik, M.: *Optimal luminance contrast of vehicle signalling lamps*, in *Proceedings of the 8th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 13 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 171–182, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2009).
- [72] Moore, D. W.; Rumar, K.: *Historical Development and Current Effectiveness of Rear Lighting Systems*, Techn. Ber. Report No. UMTRI-99-31, The University of Michigan (1999).
- [73] Mortimer, R. G.: *Automotive Rear Lighting and Signaling Research*, Techn. Ber. HSRI Report No. HuF-5, Highway Safety Research Institute, University of Michigan, Huron Parkway and Baxter Road, Ann Arbor, Michigan 481 05 (1970).

- [74] Mortimer, R. G.: *Perceptual Factors in Rear-End Crashes*, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting **34**(8), S. 591–594 (1990).
- [75] Naumann, H.; Schröder, G.; Löffler-Mang, M.: *Handbuch Bauelemente der Optik – Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik*, Carl Hanser Verlag, München Wien, 7 Aufl. (2014).
- [76] Öztuna, D.; Elhan, A.; Tüccar, E.: *Investigation of four different normality tests in terms of type I error rate and power under different distributions*, Turkish Journal of Medical Sciences **36**(3), S. 171–176 (2006).
- [77] Pape, H.-C.; Klinke, R.; Silbernagl, S.; Kurtz, A.: *Physiologie*, Thieme Verlagsgesellschaft, Stuttgart (2010).
- [78] Paroni, S.; Londero, A.; Sveltini, M.: *Luminance homogeneity of rear-lamps lighting functions: comparison of some OEM's analytical evaluation criteria*, in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 16 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 555–564, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2015).
- [79] Pohlmann, W.; Dworzak, M.: *OLED, neue Dimensionen, neue Herausforderungen*, in *VDI-Berichte 2221 – Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*, S. 59–70, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2014).
- [80] Polin, D.; Khanh, T. Q.: *Research on Visual Perception of Rear Lights*, in *Proceedings of the 17th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 17 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 519–527, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2017).
- [81] Pope, M.; Kallmann, H. P.; Magnante, P.: *Electroluminescence in Organic Crystals*, The Journal of Chemical Physics **38**(8), S. 2042–2043 (1963).
- [82] Ries, C.; Polin, D.; Schiller, C.; Khanh, T. Q.: *Evaluation of Rear Lights in Driving Situations*, in *Proceedings of the 17th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 17 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 529–536, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2017).

-
- [83] Ripperger, J.: *Lichttechnische Anforderungen an Schluß- und Bremsleuchten für Kraftfahrzeuge*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt (2001).
- [84] Ripperger, J.: *Luminance: The Future Photometric for Rear- and Brake-lights*, in *Proceedings of Progress in Automobile Lighting (PAL)* (Schmidt-Clausen, H.-J., Hg.), Bd. 9 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 810–816, Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München (2001).
- [85] Sachs, L.; Hedderich, J.: *Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 12 Aufl. (2006).
- [86] Saxena, K.; Jain, V. K.; Mehta, D. S.: *A review on the light extraction techniques in organic electroluminescent devices*, Opt. Mater. **32**(1), S. 221–233 (2009).
- [87] Scheer, J. T.; Polin, D.; Khanh, T. Q.: *Analysis of the Brightness of Rear Lights in Encounter Situations*, in *Proceedings of the 17th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 17 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 537–546, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2017).
- [88] Schiller, C.: *Untersuchungen über spektrale Kontrastempfindlichkeitsfunktionen des menschlichen Auges im mesopischen Bereich und ihre Einflussparameter*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt (2015).
- [89] Schmidt-Clausen, H.-J.: *Report on the Demonstration of Devices Having Different Light Intensities and Brightnesses with Regard to their Dazzling Effects*, Techn. Ber. TRANS/SC1/WP29/GRE/R.57, Economic Commission for Europe Inland Transport Committee, Working Party on Road Transport, Group of Experts on the Construction of Vehicles, Group of Rapporteurs on Lighting and Light-Signalling (GRE) (1983).
- [90] Schmidt-Clausen, H.-J.: *Optimum Luminances and Areas of Rear-Position Lamps and Stop Lamps*, in *Proceeding of the 10th International Technical conference on Experimental Safety Vehicles*, S. 220–224, U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration (1985).

- [91] Schmidt-Clausen, H.-J.: *Möglichkeiten zur Verbesserung des Signalbildes “Bremsen“ bei Kraftfahrzeugen*, in *40 Jahre Lichttechnik Darmstadt 1956-1996*, S. 250–261 (1996).
- [92] Schwenkschuster, L.; Vollmer, M.: *Phantom Light: known phenomenon vs. new regulatory approach*, in *Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 15 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 235–243, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2013).
- [93] Shapiro, S. S.; Wilk, M. B.: *An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)*, *Biometrika* **52**(3/4), S. 591–611 (1965).
- [94] Sivak, M.: *Current Human-Factors Issues and Findings in Automotive Headlighting and Signaling*, in *Proceedings of Progress in Automobile Lighting (PAL)*, S. 193–197 (1995).
- [95] Sivak, M.; Schoettle, B.; J. Flannagan, M.; Minoda, T.: *Effectiveness of Clear-Lens Turn Signals in Direct Sunlight*, Techn. Ber. Report No. UMTRI-2005-1, The University of Michigan (2005).
- [96] Skinner, N. P.; Bullough, J. D.: *Impacts of Dynamic Rear Lighting on Driver Response*, SAE Technical Paper **2014-01-0434** (2014).
- [97] Smith, L. H.; Wasey, J. A. E.; Barnes, W. L.: *Light outcoupling efficiency of top-emitting organic light-emitting diodes*, *Applied Physics Letters* **84**(16), S. 2986–2988 (2004).
- [98] Stanley, P. A.; Davies, A. K.: *The effect of field of view size on steady-state pupil diameter*, *Ophthalmic and Physiological Optics* **15**(6), S. 601–603 (1995).
- [99] Strasburger, H.; Rentschler, I.; Jüttner, M.: *Peripheral vision and pattern recognition: A review*, *Journal of Vision* **11**(5), S. 13 (2011).
- [100] Tang, C. W.; VanSlyke, S. A.: *Organic electroluminescent diodes*, *Applied Physics Letters* **51**(12), S. 913–915 (1987).

-
- [101] Tatsumoto, M.; Kajiya, N.; Eda, T.; Kaneko, M.; Kobayashi, S.; Ayama, M.; Hirata, K.: *Discomfort glare from brake lamps in patients with migraine*, in *Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 15 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 107–111, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2013).
- [102] Tiecheng, W.; Jian, H.; Ye, C.; Jun, S.: *Glare Effect of LED High mounted Stop Lamps with Different Luminance Distributions*, in *Proceedings of the 17th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 17 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 501–508, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2017).
- [103] Trojak, T.; Guebel, N.: *The OLED Technology: Possibilities, Advantages, Challenges*, in *Proceedings of VISION 2014 – Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving*, Bd. 3, Société des Ingénieurs de l’Automobile (SIA), Paris, Frankreich (2014).
- [104] Tsujimura, T.: *OLED Displays – Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey (2012).
- [105] Tukey, J. W.: *Comparing Individual Means in the Analysis of Variance*, *Biometrics* **5**(2), S. 99–114 (1949).
- [106] Vieregge, T.: *OLED – Potential and challenges for automotive lighting*, in *Proceedings of the 9th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 14 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 453–458, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2011).
- [107] Vollmer, M.; Schwegler, V.: *The world’s first serial OLED tail lamp as a milestone for developing a brilliant future of automotive lamps*, in *Proceedings of VISION 2016 – Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving*, Bd. 4, Société des Ingénieurs de l’Automobile (SIA), Paris, Frankreich (2016).
- [108] Watson, A. B.: *A formula for the mean human optical modulation transfer function as a function of pupil size*, *J. Vis.* **13**(6), S. 1–11 (2013).

-
- [109] Watson, A. B.; Yellott, J. I.: *A unified formula for light-adapted pupil size*, J. Vis. **12**(10), S. 1–16 (2012).
- [110] Wehlus, T.: *Anorganisch-organische Hybridsysteme als Funktionsstrukturen für die integrierte Optoelektronik*, Dissertation, Universität Augsburg (2011).
- [111] Winer, B. J.; Brown, D. R.; Michels, K. M.: *Statistical principles in experimental design*, McGraw-Hill, New York, 3 Aufl. (1991).
- [112] Winn, B.; Whitaker, D.; Elliott, D. B.; Phillips, N. J.: *Factors affecting light-adapted pupil size in normal human subjects.*, Investigative Ophthalmology & Visual Science **35**(3), S. 1132 (1994).
- [113] Wu, C.-C.; Lin, C.-L.; Hsieh, P.-Y.; Chiang, H.-H.: *Methodology for optimizing viewing characteristics of top-emitting organic light-emitting devices*, Applied Physics Letters **84**(20), S. 3966–3968 (2004).
- [114] Zandi, B.; Polin, D.; Khanh, T. Q.: *Validity range of luminance and luminous intensity for a right characterization of rear lamps under mesopic vision conditions*, in *Proceedings of the 17th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 17 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 509–518, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2017).

Publikationen in Zeitschriften

- [115] Rabenau, P.; Ogonda, M.; Pohlmann, W.: *Flexible OLEDs in der Fahrzeugheckbeleuchtung*, Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) **119**(2), S. 16–21 (2017).
- [116] Rabenau, P.; Ogonda, M.; Pohlmann, W.: *Flexible OLEDs in Vehicle Rear Lighting*, Automobiltechnische Zeitschrift worldwide (ATZ worldwide) **119**(2), S. 16–21 (2017).
- [117] Rabenau, P.; Patzig, F.; Ollig, J.-M.; Khanh, T. Q.: *Model for the Evaluation of the Optimum Brightness of Homogeneous Taillights*, Automobiltechnische Zeitschrift worldwide (ATZ worldwide) **119**(7-8), S. 64–68 (2017).
- [118] Rabenau, P.; Patzig, F.; Ollig, J.-M.; Khanh, T. Q.: *Modell zur Bewertung der optimalen Helligkeit von homogenen Schlussleuchten*, Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) **119**(7-8), S. 72–77 (2017).
- [119] Thomas, W.; Lendle, R.; Rabenau, P.: *OLED in der Fahrzeugbeleuchtung – Enorme Möglichkeiten*, Elektronik automotive **2015**(12), S. 42–47 (2015).

Tagungsbeiträge

- [120] Rabenau, P.; Keibler, C.; Fichet, G.; Törker, M.: *Investigation of Red, Flexible OLED devices for Automotive Rear Lighting*, in *Proceedings of the 5th International Forum on Automotive Lighting (IFAL)*, S. 162–172, Shanghai, China (2017).
- [121] Rabenau, P.; Khanh, T. Q.: *OLED Technology in Rear Lamps – A Novel Development Approach for a New Automotive Light Source*, in *Proceedings of VISION 2016 – Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving*, Bd. 4, Société des Ingénieurs de l'Automobile (SIA), Paris, Frankreich (2016).
- [122] Rabenau, P.; Patzig, F.; Khanh, T. Q.: *Investigation of the Optimum Brightness of Dynamic Taillights*, in *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 17 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 491–499, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2017).
- [123] Reschke, J.; Rabenau, P.; Hamm, M.; Neumann, C.: *Symbolische Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion*, in *VDI-Berichte 2323 – Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*, S. 95–106, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2018).

Betreute Arbeiten

- [124] Bachmaier, D.: *Optische Charakterisierung und Validierung eines OLED-Heckleuchtenmusters*, Bachelorarbeit, Technische Hochschule Ingolstadt (2016).
- [125] Gail, J.: *Photometrische und colorimetrische Charakterisierung eines HDR-Displays zur Heckleuchtenvisualisierung*, Bachelorarbeit, Justus-Liebig-Universität Giessen (2016).
- [126] Kunick, F.: *Arbeiten zum Thema „Grundsatzstudien zur Helligkeitsempfindung von Fahrzeugschlussleuchten“*, Praxissemester, Hochschule Aalen (2016).
- [127] Lang, M.: *Arbeiten zum Thema „Programmierung einer OLED Versuchsdatenbank“*, Praxissemester, Hochschule Aalen (2016).
- [128] Ollig, J.-M.: *Untersuchungen zur Bestimmung der optimalen Helligkeiten von adaptiven OLED Schlussleuchten*, Masterarbeit, Technische Hochschule Köln (2017).
- [129] Patzig, F.: *Arbeiten zum Thema „Implementierung mathematischer Modelle in MATLAB zur Beschreibung des Sehprozesses“*, Fachpraktikum, Universität Leipzig (2017).

Weitere Beiträge

Veröffentlichungen in Tagungsbänden

Kastner, J.; Rabenau, P.; Tontsch, F.-U.: *Circadian Lighting – Human Centric Lighting as Passenger*, in *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* (Khanh, T. Q., Hg.), Bd. 17 von *Darmstädter Lichttechnik*, S. 659–666, Herbert Utz Verlag GmbH, München (2017).

Vorträge auf Tagungen

Rabenau, P.: *Optische Komponenten im Automobil*, SPECTARIS Herbsttagung des Fachverbandes Photonik, Berlin (Deutschland), 22.09.2015.

Rabenau, P.: *OLED Technology in Automotive Lighting*, OLEDs World Summit 2016, San Diego (Kalifornien, USA), 21.09.2016.

Rabenau, P.: *OLED Technology in Automotive Lighting*, OSA Light, Energy and the Environment Congress 2016, Leipzig (Deutschland), 16.11.2016.

Rabenau, P.; Berlitz, S.: *Lichttechnik im autonomen Fahrzeug*, SPECTARIS Branchentreff Photonik, Ingolstadt (Deutschland), 06.03.2018.

Rabenau, P.; Khanh, T. Q.: *Automotive OLED Technology: Lighting and Human Perception*, Smart Automotive Surfaces 2018, Novi (Michigan, USA), 11.10.2018.

Patente

Lendle, R., Horn, M., Thomas, W., Rabenau, P.: *Dreidimensionale organische Leuchtdiodenvorrichtung*, DE 10 2015 012 278 A1, 09.09.16

Lendle, R., Horn, M., Thomas, W., Rabenau, P.: *Biegung einer organischen Leuchtdiodenvorrichtung*, DE 10 2015 012 279 A1, 09.09.16

Thomas, W., Rabenau, P.: *Beleuchtungsvorrichtung für ein Kraftfahrzeug*, DE 10 2015 013 947 A1, 20.10.2016.

Forschungsprojekte

Im Rahmen der Promotion wurden folgende Vorhaben unterstützend oder hauptverantwortlich als Mitarbeiter der Audi AG betreut:

R2D2 – Roll to Device 2, gefördert vom *Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)* unter dem Förderkennzeichen 13N12949. Innerhalb des Teilprojektes *Integration und Testing für den Einsatz von flexiblen OLEDs im Automobilbereich* wurden Methoden, Prozesse und Technologien zur Integration eines flexiblen OLED Moduls in eine Fahrzeugheckleuchte entwickelt. Das Projekt wurde zum Ende des Jahres 2015 abgeschlossen.

Pi-Scale, gefördert innerhalb des *HORIZON 2020* Programms der Europäischen Union (Grant Agreement Nummer: 688093). Ziel des Projektes ist die Nutzung bestehender Infrastruktur als europäische Pilotlinie für flexible OLEDs. Im Arbeitspaket lag der Fokus auf der Optimierung der Technologie sowie des Entwicklungs- und Produktionsprozesses. Als Einflussparameter wurden hierbei im Besonderen die photometrischen und kolorimetrischen Eigenschaften der Lichtquelle sowie die Lebensdauereigenschaften für den Einsatz in einer Fahrzeugheckleuchte berücksichtigt. Das Projekt lief bis Ende des Jahres 2018.